

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

APLICACIÓ DE LA TÈCNICA DE BRUNYIT PER A LA MILLORA DE LES PROPIETATS DELS ACERS INOXIDABLES AUSTENÍTICS METASTABLES



Memòria i Annexos

Autor:	Eric Rodríguez Mañá
Director:	Gemma Fargas Ribas
Co-Director:	Ramon Jerez Mesa
Convocatòria:	Maig 2018

Resum

L'objectiu d'aquest projecte és la millora de les propietats superficials dels acers inoxidable austenítics metastables (AISI 301 LN) mitjançant la tècnica del brunyit amb bola. Aquesta tècnica es basa en deformar plàsticament la superfície del material, això es rellevant perquè en el cas de l'acer inoxidable austenític metastable quan se li aplica aquesta deformació es transforma part de l'austenita en martensita. Per estudiar l'efecte que produeix aquesta tècnica de tractament superficial, s'han utilitzat dues mostres d'acers amb condicions inicials diferents. La primera mostra és una làmina d'acer amb un 10% de fase inicial martensítica i la segona mostra és una làmina d'acer amb un 18% de fase inicial martensítica. Un cop estudiades ambdues làmines, aquestes seran comparades amb dos làmines d'acer més que s'estudien en paral·lel a aquest treball en el mateix grup de recerca, una en estat de recuit i l'altre amb un 38% de fase inicial martensítica.

Aquesta tècnica de tractament superficial s'ha dut a terme en diferents condicions que poden alterar els efectes que produeix el brunyit amb bola sobre la superfície com ho són la direcció en que s'ha realitzat el brunyit (en direcció al laminat o perpendicular a aquest), aplicar vibració a l'eina de brunyir o realitzar el procés de brunyit amb una o cinc passades.

Els resultats obtinguts en cadascuna de les mostres posen en evidència com afecta el contingut inicial de fase martensítica en cada làmina pel que fa a les petjades realitzades amb la tècnica de brunyit amb bola. Es manifesta de forma molt clara com s'assoleix una millora de les propietats mecàniques de la làmina en estat de recuit que, a mesura que augmenta el contingut inicial de fase martensítica en la resta de mostres, disminueix l'efecte del brunyit respecte les propietats de la làmina d'acer original, fins al punt de trobar diferències poc notables en les làmines amb un 18% i un 38% de fase martensítica.

Resumen

El objetivo de este proyecto es la mejora de las propiedades superficiales de los aceros inoxidable austeníticos metaestables (AISI 301 LN) mediante la técnica del bruñido con bola. Este tipo de acero se caracteriza por la transformación de austenita en martensita cuando éste sufre deformación plástica. Para estudiar el efecto que produce esta técnica de tratamiento superficial, se han utilizado dos muestras de aceros con condiciones iniciales diferentes. La primera muestra es una lámina de acero con un 10% de fase inicial martensítica y la segunda muestra es una lámina de acero con un 18% de fase inicial martensítica. Una vez estudiadas ambas láminas, estas serán comparadas con dos láminas más que se estudian en paralelo a este trabajo en el mismo grupo de investigación, una en estado de recocido y la otra con un 38% de fase inicial martensítica.

Esta técnica de tratamiento superficial se ha llevado a cabo en diferentes condiciones que pueden alterar los efectos que produce el bruñido con bola sobre la superficie como lo son la dirección en que se ha realizado el bruñido (en dirección al laminado o perpendicular a este), aplicar vibración a la herramienta de bruñir o realizar el proceso de bruñido con una o cinco pasadas.

Los resultados obtenidos en cada una de las muestras ponen en evidencia cómo afecta el contenido inicial de fase martensítica en cada lámina con respecto a las huellas realizadas con la técnica de bruñido con bola. Se manifiesta de forma muy clara cómo se logra una mejora de las propiedades mecánicas de la lámina en estado de recocido que, a medida que aumenta el contenido inicial de fase martensítica en el resto de las muestras, disminuye el efecto del bruñido respecto las propiedades de la lámina de acero original, hasta el punto de encontrar diferencias poco notables en las láminas con un 18% y un 38% de fase martensítica.

Abstract

The objective of this project is the improvement of the surface properties of metastable austenitic stainless steels (AISI 301 LN) by means of the burning technique with ball. This type of steel is characterized by the transformation of austenite into martensite when it suffers from plastic deformation. To study the effect produced by this surface treatment technique, two samples of steels with different initial conditions have been used. The first sample is a steel sheet with a 10% initial martensitic phase and the second sample is a steel sheet with a 18% initial martensitic phase. Once studied both sheets, these will be compared with two steel sheets more that are studied at a time to this work in the same research group, one in annealing state and the other with a 38% initial phase martensitic.

This surface treatment technique has been carried out under different conditions that can alter the effects produced by burning with a ball on the surface such as the burnished direction (in the direction of the laminate or perpendicular to this one), apply vibration to the burning tool or perform the burning process with one or five passes.

The results obtained in each one of the samples show how the initial content of the martensitic phase affects each sheet with respect to the footprints made with the burning technique with ball. It shows very clearly how an improvement in the mechanical properties of the foil in annealing state is achieved, which, as the initial content of the martensitic phase increases, in the rest of the samples, reduces the effect of burning on the properties of the original steel sheet, to the point of finding very little differences in the sheets with 18% and 38% martensitic phase.

Índex

1. INTRODUCCIÓ	3
1.1. QUÈ ÉS L'ACER?	3
1.1.1. ELS ACERS ALIATS	4
1.2. ELS ACERS INOXIDABLES	5
1.2.1. DIAGRAMES DELS ACERS INOXIDABLES I MICROESTRUCTURES	6
1.2.2. CLASSIFICACIÓ	10
1.2.3. AVANTATGES I DESAVANTATGES DE L'ACER INOXIDABLE	15
1.2.4. NOMENCLATURA	16
1.3. ACERS INOXIDABLES AUSTENÍTICS METASTABLES	17
1.3.1. TRANSFORMACIÓ MARTENSÍTICA	18
1.4. TÈCNICA DEL BRUNYIT	25
1.4.1. BRUNYIT AMB BOLA	26
1.4.2. BRUNYIT AMB BOLA ASSISTIT PER VIBRACIÓ	28
1.4.3. EINA DE BRUNYIR	29
2. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL	36
2.1. MATERIAL ESTUDIAT	36
2.1.1. COMPOSICIÓ QUÍMICA	36
2.1.2. MICROESTRUCTURA	37
2.1.3. PROPIETATS FÍSQUES	39
2.1.4. PROPIETATS MECÀNIQUES	39
2.2. METODOLOGIA	40
2.3. SELECCIÓ DE LES VARIABLES DEL PROCÉS DE BRUNYIT	41
2.3.1. MINITAB	42
2.3.2. SELECCIÓ DE LES CARACTERÍSTIQUES DE LES NOVES MOSTRES	43
2.4. PREPARACIÓ DE LES MOSTRES	44
2.5. CARACTERITZACIÓ DE LA SUPERFÍCIE	51
2.5.1. RUGOSITAT	51
2.5.2. MICROSCOPI ÒPTIC CONFOCAL	53
2.5.3. MICROSCOPI ELECTRÒNIC DE RASTREIG (SEM)	54
2.5.4. INTERFERÒMETRE ÒPTIC LÀSER	55
2.6. CARACTERITZACIÓ MECÀNICA	56
2.6.1. MICRODURESA	56

3. RESULTATS I DISCUSSIÓ	59
3.1. RESULTATS DE LA SELECCIÓ DE VARIABLES DEL BRUNYIT	59
3.1.1. REPRESENTACIÓ NUMÈRICA DELS RESULTATS	59
3.1.2. REPRESENTACIÓ GRÀFICA AMB MINITAB	61
3.1.3. OBSERVACIONS SOBRE EL COMPORTAMENT DE L'ACER	62
3.2. ANÀLISI DE LA SUPERFÍCIE DE LES PETJADES	63
3.2.1. RESULTATS OBTINGUTS AMB EL MICROSCOPI ÒPTIC CONFOCAL	63
3.2.2. RESULTATS OBTINGUTS AMB EL RUGOSÍMETRE 3D	65
3.2.3. RESULTATS OBTINGUTS AMB EL MICROSCOPI ELECTRÒNIC DE RASTREIG	68
3.3. ANÀLISI DE LA MICROESTRUCTURA DE LES PETJADES	70
3.3.1. PERFIL DE DURESES	72
4. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	76
5. CONCLUSIONS	77
6. PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	78
7. BIBLIOGRAFIA	80
ANNEX A	83
A1. RESULTATS OBTINGUTS MITJANÇANT MICROSCOPIS ÒPTICS LÀSER	83
I. RESULTATS OBTINGUTS AMB EL MICROSCOPI ÒPTIC CONFOCAL	83
A2. RESULTATS OBTINGUTS DE LA RUGOSITAT SUPERFICIAL	86
I. RESULTATS OBTINGUTS AMB EL RUGOSÍMETRE 3D	86
II. RESULTATS OBTINGUTS AMB L'INTERFERÒMETRE	89
A3. RESULTATS OBTINGUTS AMB MICRODURESES	90
I. TAULES AMB ELS VALORS DE DURESA	90
II. GRÀFIQUES DELS PERFILS DE DURESA	92

1. Introducció

1.1. Què és l'acer?

L'acer és un aliatge de ferro (Fe) i carboni (C) sempre que el percentatge del carboni sigui inferior al 2%. Aquest percentatge de carboni sol variar entre el 0.05% i el 2% com a màxim. En general, és un material d'una elevada duresa (no es ratlla), tenacitat (resistència als cops) i de gran resistència mecànica (1).

L'acer és per tant un metall ferrós degut a que el seu component principal és el ferro, i de la seva fabricació, com tots els metalls ferrosos, se n'encarrega la indústria siderúrgica. Conserva les característiques metàl·liques del ferro en estat pur, però l'addició de carboni i d'altres elements tant metàl·lics com no metàl·lics millora les seves propietats fisicoquímiques. A vegades s'incorporen l'aliatge altres materials com el crom (Cr), el níquel (Ni) o el manganés (Mn) amb la intenció d'aconseguir determinades propietats i es denominen acers aliats. Cal destacar que l'acer posseeix diferents constituents segons la seva temperatura, concretament, de més a menys duresa, perlita, cementita i ferrita; a més de l'austenita (per a més informació consultar el Diagrama Ferro-Carboni).

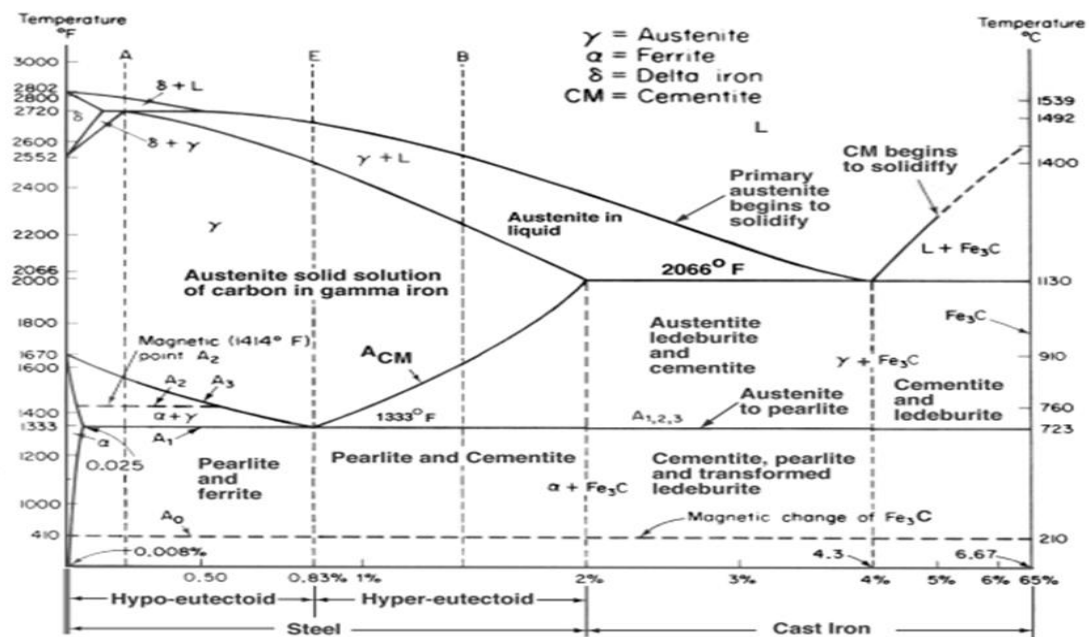


Figura 1. Diagrama Ferro-Carboni (1).

1.1.1. Els acers aliats

Els acers aliats es divideixen en dos grups: Els acers de baix aliatge i acers d'alt aliatge. Per a diferenciar els dos grups, Smith i Hashemi varen situar una barrera al 4% en el pes dels aliants, mentre que Degarmo la va definir al 8%. Tot i així, la expressió d'acer aliat habitualment fa referència als acers de baix aliatge.

És important saber que tots els acers són en realitat un aliatge, però no tots els acers són "acers aliats". Els acers més simples estan compostos per ferro (Fe)(prop del 99%) i carboni (C)(aproximadament entre 0.1 i 1%). Tot i això, el terme "acer aliat" fa referència a acers amb altres elements aliants a més del carboni on els més comuns són el manganès, níquel, molibdè, crom, vanadi, silici i bor.

La millora de propietats d'alguns dels acers aliats es mostra a continuació, pel que fa als acers al carboni: resistència, duresa, tenacitat, resistència al desgast, trempabilitat i resistència en calent.

- Manganès: li aporta a l'acer duresa i resistència al desgast.
- Crom: Augmenta la seva duresa, li dona brillantor i fa que l'acer sigui inoxidable.
- Níquel: evita la corrosió de l'acer, millora la resistència a la tracció i la seva tenacitat.

Per assolir aquestes millors propietats l'acer pot necessitar un tractament tèrmic.

1.2. Els acers inoxidable

La majoria dels metalls s'oxiden, per exemple la plata es posa negra, l'alumini canvia a blanc, el coure canvia a verd i ordinàriament l'acer canvia a vermell. En el cas d'acer, el ferro present es combina amb l'oxigen de l'aire per formar òxids de ferro o "rovell".

A principis del segle XX alguns metal·lurgistes van descobrir que addicionant poc més de 10% de crom a l'acer, aquest no presentava rovell sota condicions normals; la raó d'això és que el crom sol unir-se primerament amb l'oxigen de l'aire per formar una prima pel·lícula transparent d'òxid de crom sobre la superfície de l'acer i exclou l'oxidació addicional de l'acer inoxidable. Aquesta pel·lícula es diu capa passiva. En el cas que passi dany mecànic o químic, aquesta pel·lícula és acte reparable en presència d'oxigen. Per aquest motiu, la norma UNE-EN 10088 defineix els acers inoxidable com aquells aliatges fèrrics que contenen una proporció de crom superior o igual al 10.5% (2).

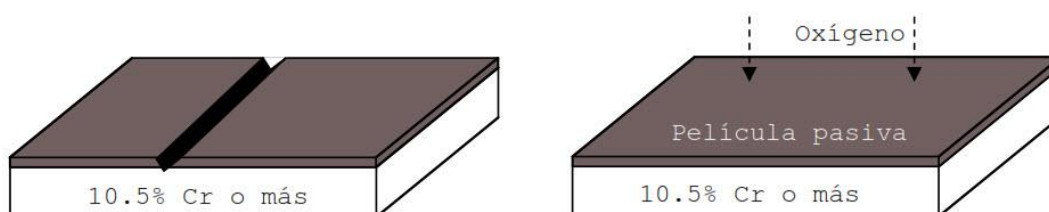


Figura 2. Acer inoxidable amb pel·lícula passiva (2).

També presenten altres elements d'aliatge com el níquel (Ni), molibdè (Mo), manganès (Mg), titani (Ti) que aporten generalment una millora de la resistència a la corrosió. Tot i així, els principals elements d'aliatge són el crom, níquel i molibdè.

Crom	Níquel	Molibdè
Formador de Ferrita i Carbur	Formador d'Austenita	Formador de Ferrita i Carbur
<ul style="list-style-type: none"> Principal responsable de la resistència a la corrosió i de la formació de la pel·lícula d'òxid. No presenta cap aportació significativa en la resistència a altes temperatures. 	<ul style="list-style-type: none"> Millora la resistència general a la corrosió en líquids no oxidants. Millora la tenacitat i ductilitat. S'afegeix als graus amb crom per a la millora de les propietats mecàniques. Augmenta la resistència elèctrica, la fatiga i augmenta la capacitat a ser soldat. Redueix la conductivitat del calor. 	<ul style="list-style-type: none"> Millora la resistència a temperatures elevades. Millora la resistència general a la corrosió en medis no oxidants, i la resistència a la corrosió per picadura en tots els medis.

Taula 1. Principals elements de l'aliatge de l'acer inoxidable i la seva influència (2).

1.2.1. Diagrames dels acers inoxidables i microestructures

Diagrama Fe-Cr i diagrama influència del carboni

La *Figura 3* mostra el diagrama d'equilibri estable Fe-Cr, la seva anàlisi presenta una forma adequada de revisar els conceptes bàsics darrere dels diferents tipus d'acers inoxidables: ferrítics, martensítics, austenítics, dúplex i enduriment per precipitació.

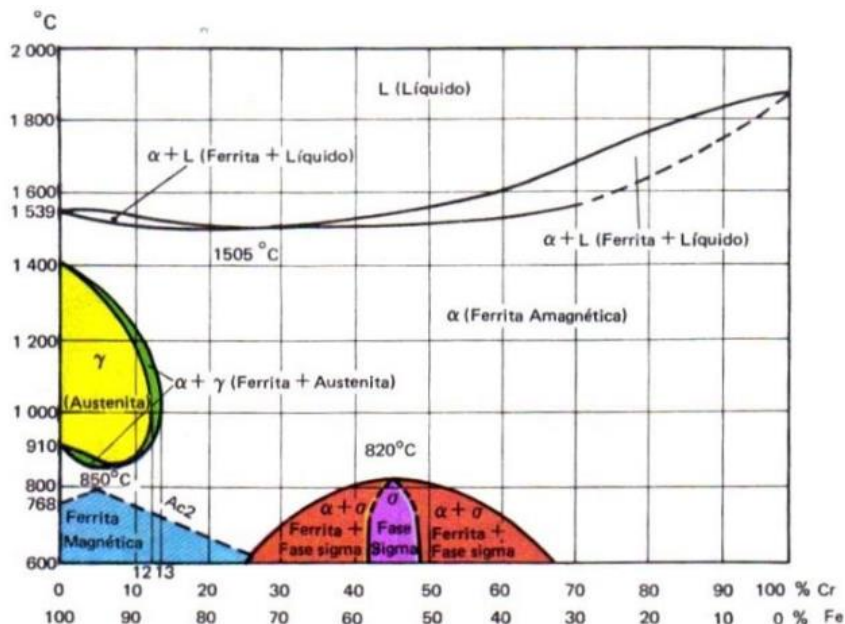


Figura 3. Diagrama Ferro (Fe) – Crom (Cr) (3).

De l'anàlisi del diagrama Cr-Fe es dedueix el següent:

- Els aliatges ferro-crom, amb menys de 12% de crom, transformen la seva estructura ferrítica a austenítica (fase gamma, γ) durant l'escalfament. Per refredament ràpid fins a la temperatura ambient, aconseguirem transformar la Austenita en Martensita (acers inoxidables martensítics).
- Els aliatges de ferro amb continguts de crom entre 12 i 13% formen a elevades temperatures estructures bifàsiques (α i γ) que refredades ràpidament a temperatura ambient, presentaran una estructura formada per Ferrita i Martensita (acers ferrítics-martensítics) (4).
- En els aliatges ferro - crom amb continguts d'aquest últim de 25 a 42% i de 48 al 65% a temperatures compreses entre 600 i 900 ° C, apareix una fase intermetàl·lica anomenada fase sigma (σ) que coexisteixen amb la ferrita. Amb continguts de crom de 42 a 48% aproximadament tota la ferrita pot transformar-se en fase sigma (σ). Aquesta fase és molt dura, fràgil i es pot dissoldre en la ferrita escalfant per sobre dels 900 ° C. En augmentar el contingut de carboni s'amplia el límit del bucle gamma (γ) sent un element afavoridor de la formació d'aquesta fase (5).

- d) Els aliatges ferro-crom amb més de 13% de Cr, mantenen la seva estructura ferrítica, des de temperatura ambient fins al punt de fusió. Durant l'escalfament, aquesta estructura no travessa el camp austenític (fase gamma), després no pot austenitzar-se i posteriorment temperar per formar Martensita. Aquests corresponen als anomenats acers inoxidables ferrítics. És important limitar el contingut de carboni per a evitar que el camp gamma s'expandeixi i prevenir la formació de Martensita. En la *Figura 4* podem veure això.

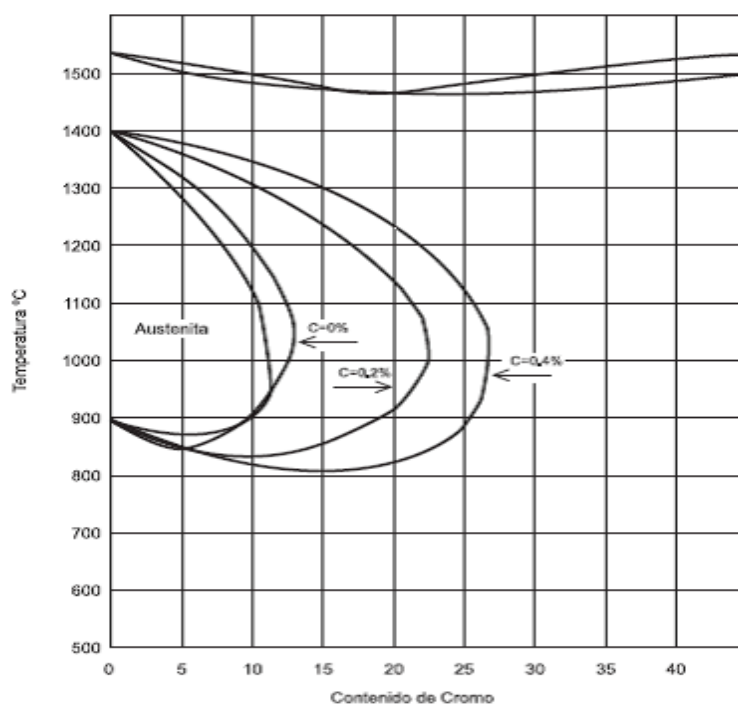


Figura 4. Influència del carboni ampliant el bucle Gamma (4).

Del diagrama d'Influència del carboni, es dedueix el següent:

- En el diagrama ferro-crom, el bucle gamma s'expandeix a la dreta en augmentar el contingut de carboni de l'aliatge. El carboni afavoreix la formació de fase gamma.
- Cal assenyalar que si el carboni arriba 0,6% el límit del bucle gamma queda limitat per a un crom aproximat del 18%. Per tant, amb carboni superior al 0,4% ja no s'amplia el bucle i l'excés de carboni queda en l'acer formant diferents tipus de carburs de ferro i crom que depenen de la temperatura, del contingut de carboni i de crom.
- Els aliatges ferro-crom-carboni, amb crom superior a 27% són ferrítics.
- Es poden aconseguir aliatges ferro-crom-carboni de fins a aproximadament 17% de crom que siguin martensítics a temperatura ambient (4).

Diagrama de fases Fe-Cr-Ni

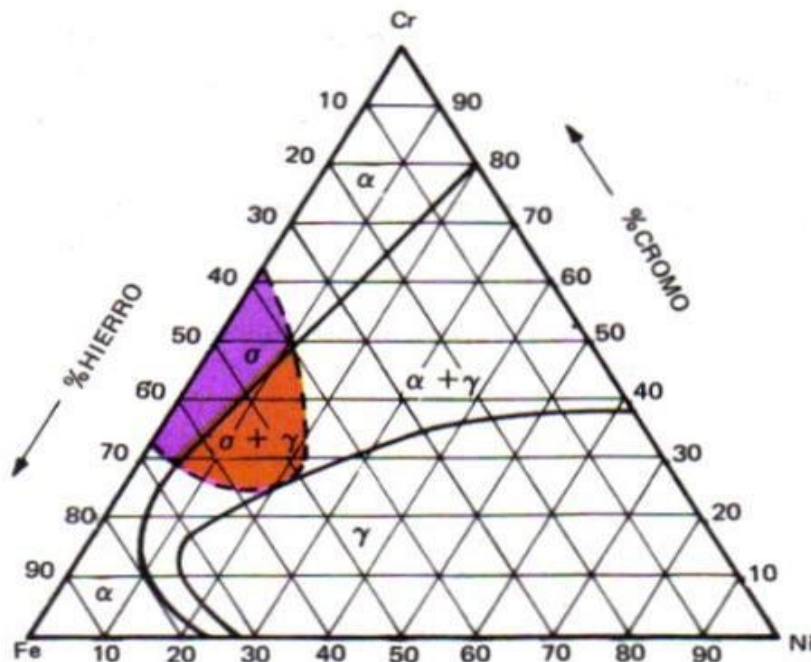


Figura 5. Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambient (3).

Influència del níquel: El níquel amplia el camp d'estabilitat de l'austenita i rebaixa la temperatura a la qual ocorre la transformació α - γ . La Figura 6 mostra el diagrama Fe-Cr-Ni, en la qual s'indica la formació a temperatura ambient de les diferents estructures segons el contingut de ferro, crom i níquel.

Fase sigma: Una de les raons per a la formació de la fase sigma en els acers inoxidable es deu a la presència de ferrita quan es manté durant molt de temps a temperatures compreses entre els 600 i 900 ° C transformant-se en un compost intermetàl·lic de ferro i crom. Aquesta fase es caracteritza fonamentalment per la seva pèrdua de ductilitat, resiliència i les seves característiques fonamentals són: Duresa superior i provoca esquerdes molt fines.

La fase sigma no només es forma en els acers amb alt contingut de crom ja que pot donar-se en els acers ferrítics amb continguts de crom des de 14%. També pot formar-se en els acers austenítics i austeno-ferrítics. La seva influència és notable en les característiques mecàniques, resistència a la corrosió i les propietats de la soldadura (5).

La importància d'aquest diagrama ternari està en què el acers inoxidable comercials més habituals estan compostos per un 75% de ferro, un 18% de crom i un 8% de níquel (6).

Diagrama de Schaeffler

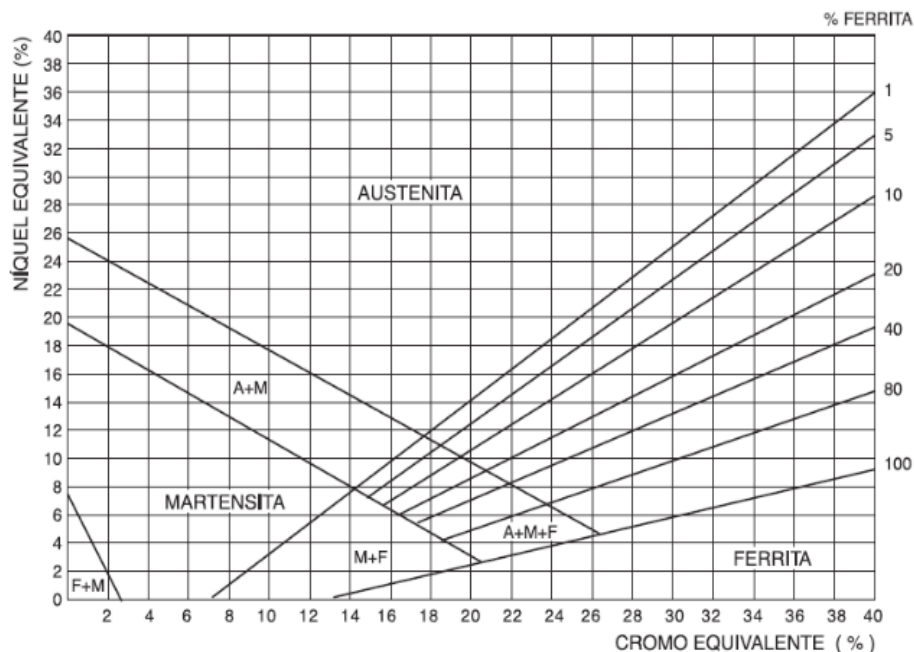


Figura 6. Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambient (4).

Procedeix del seu antecessor, el diagrama de Maurer, el qual presenta les estructures que presentarà un acer al Cr-Ni d'acord als percentatges d'aquests presents en l'acer. Antón Scheaffler ho va millorar, incorporant la influència de diferents elements d'aliatge en la formació de Ferrita i Austenita. Es va definir així el concepte de Crom equivalent i níquel equivalent. El crom equivalent incorpora els elements al·fàgens (formadors de Ferrita) i el níquel equivalent dels elements gammàgens (formadors de Austenita). Cada element va multiplicat per un factor que depèn del seu grau d'influència en la formació de Ferrita o Austenita respectivament.

$$\text{Crom equivalent: } \% Cr + \% Mo + (1,5 \times \% Si) + (0,5 \times \% Nb)$$

$$\text{Níquel Equivalent: } \% Ni + (30 \times \% C) + (0,5 \times \% Mn)$$

El diagrama de Schaeffler mostra la presència de les fases austenítica, ferrítica i martensítica pròpies dels acers Inoxidables quan són refredats a les velocitats normals de soldadura. A més presenta les zones de fragilització en fred causa de la presència de Martensita, la zona de fragilitat en calent originada per la presència de Austenita, la zona de fragilitat per presència de fase Sigma i la zona de Creixement de gra ferrític.

1.2.2. Classificació

Acers inoxidables Martensítics

Els acers inoxidables martensítics són essencialment aliatges Fe-Cr que contenen entre 12 i 17 per cent de Cr i tenen prou carboni (0.15 a 1.0% C) perquè es pugui produir mitjançant el temperat una estructura martensítica a partir de la regió de la fase austenítica. Aquests aliatges es denominen martensítics perquè són capaços de desenvolupar una estructura d'aquest tipus després d'un tractament tèrmic de austenització i temperat. Com que la composició dels acers inoxidables martensítics s'ajusta per optimitzar la seva solidesa i duresa, la resistència a la corrosió d'aquests acers és relativament dolenta en comparació amb els de tipus ferrític i austenític.

Quan el contingut de carboni dels aliatges Fe-Cr s'incrementa fins a gairebé 1% C, el bucle α s'engrandeix. En conseqüència, els aliatges Fe-Cr amb gairebé 1% C poden contenir al voltant de 16 per cent de Cr i seguir sent capaços de produir una estructura martensítica en ser austenitzats i temperats instantàniament.

L'aliatge tipus 440C amb 16 per cent de Cr i 1 per cent de C és l'acer inoxidable martensític de més alta duresa entre tots els acers resistents a la corrosió. La seva elevada duresa es deu a una matriu martensítica dura i de la presència d'una gran concentració de carburs primaris, com es mostra en la microestructura de l'acer 440C a la *Figura 7* (7).

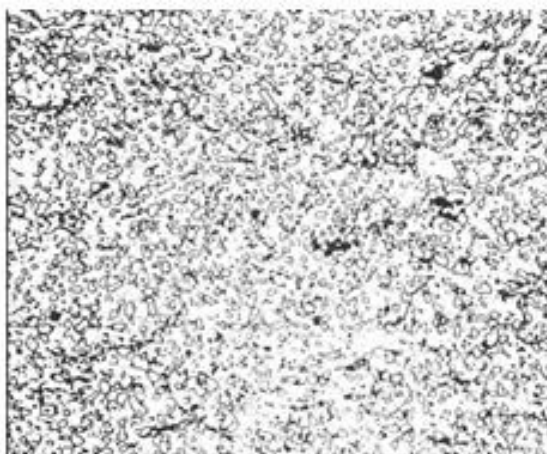


Figura 7. Acer inoxidable (martensític) tipus 440C endurit per austenització a 1.010 ° C (1.850 °F) i refredat per aire. L'estructura consisteix en carburs primaris en una matriu de martensita (7).

Acers inoxidable Ferrítics

Es caracteritzen per la seva estructura ferrítica a qualsevol temperatura per tant no hi ha transformacions de la ferrita en austenita en l'escalfament ni transformació martensítica en el refredament. Per aquesta raó no hi ha possibilitat de regeneració del gra i la recristal·lització només és possible mitjançant una deformació plàstica en fred, previ recuit o mitjançant una deformació en calent. En aquests acers quan el contingut de crom augmenta la resiliència disminueix.

S'identifiquen per tenir una composició de fins a un 11% a 30% de Cr i carboni màxim de 0.12%. El seu comportament estructural es regeix sota els alineaments de la forma cristal·lina BCC (estructura cubica centrada en el cos).

Els acers inoxidable ferrítics tenen un cost relativament baix perquè no contenen níquel. S'usen principalment com a materials de construcció de tipus general quan es necessita la seva resistència especial a la corrosió i a la calor. A la *Figura 7* es mostra la microestructura de l'acer inoxidable ferrític tipus 430 en estat recuit. La presència dels carburs en aquest acer redueix en cert grau la seva resistència a la corrosió. En dates més recents s'han desenvolupat nous compostos ferrítics amb molt baixos nivells de carboni i nitrogen, amb la qual cosa ha millorat la seva resistència a la corrosió (7).



Figura 8. Tira d'acer inoxidable (ferrític) tipus 430 recuit a 788 ° C (1.450 ° F). L'estructura consisteix en una matriu de ferrita amb partícules de carbur disperses (7).

Els acers inoxidable austenítics són en essència aliatges ternàries de ferro-crom-níquel que contenen entre 16 i 25 per cent de Cr i de 7 a 20 per cent de Ni. La presència del níquel, que té una estructura cristal·lina CCC, permet que aquesta estructura es mantingui a la temperatura ambient. L'alta mal·leabilitat dels acers inoxidable austenítics es deu a la seva estructura cristal·lina CCC.

Aquests acers tenen normalment major resistència a la corrosió que els de tipus ferrític i martensític perquè els carburs poden conservar-se en solució sòlida mitjançant el refredament ràpid a partir d'altres temperatures. No obstant això, si aquestes aliatges es soldessin o refredessin lentament a partir d'altres temperatures en el rang de 870 a 600 ° C, poden tornar-se susceptibles a la corrosió intergranular perquè els carburs que contenen crom es precipiten en els límits del gra.

Aquesta dificultat es pot evitar fins a cert punt si es redueix el contingut màxim de carboni en l'aliatge a prop de 0,03% C. A la Figura 10 es mostra la microestructura d'un acer inoxidable tipus 304 que ha estat recuit a 1065 ° C i refredat per aire (7).

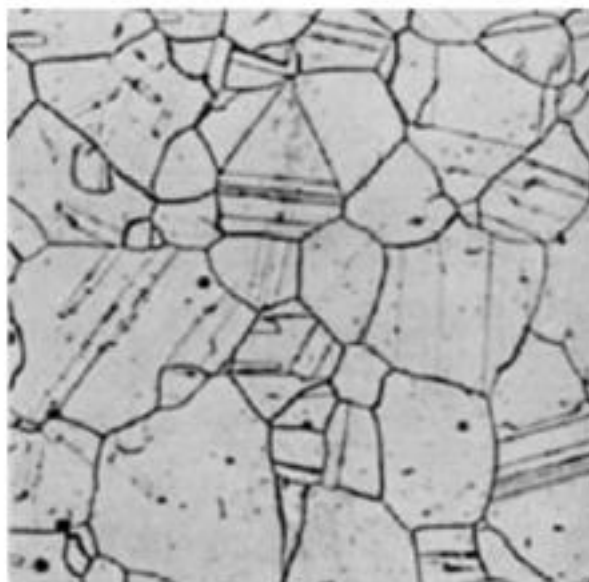


Figura 9. Acer inoxidable (austenític) tipus 304 recuit 5 minuts a 1.065 ° C (1.950 ° F) i refredat per aire. L'estructura consisteix en grans d'austenita equiaxials (7).

La Taula 2 mostra els diferents tipus d'acers inoxidable respecte a la seva classificació tenint en compte el percentatge de carboni i els tipus d'aliatges utilitzats per a la producció dels acers inoxidable.

Distintos tipos de aceros inoxidable									
AISI	UNS	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%P	%S	Otros
ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS									
405	S40500	0,08	1	1	13	--	0,04	0,03	0,2 Al
430	S43000	0,12	1	1	17	--	0,04	0,03	--
434	S43000	0,12	1,25	1	17	--	0,04	0,03	1,0 Mn
446	S44600	0,2	1,5	1	25	--	0,04	0,03	0,25 N
18SR		0,004	0,3	1	18	--	--	--	2,0 Al, 0,4 Ti
Al 29-4 2	S44800	0,01	0,3	0,2	29	2,2	0,025	0,02	3,8 Mo
ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS									
303	S30300	0,15	2	1	18	9	0,2	>0,15	0,06 Mo
304	S30400	0,08	2	1	19	9,2	0,045	0,03	--
316	S31600	0,08	2	1	17	12	0,045	0,03	2,0Mo
317	S31700	0,08	2	1	19	13	0,045	0,03	3,5Mo
321	S32100	0,08	2	1	19	14	0,045	0,03	Ti=5xC min
347	S34700	0,08	2	1	18	11	0,045	0,03	Cb+Ta=10xC min
20 Mo6		0,03	1	0,8	24	35	0,03	0,03	5,7 Mo, 3Cu
254 Smo	S31254	0,03	1	0,8	20	18	0,03	0,01	6,2Mo 9,7Cu 0,2N
ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS									
403	S40300	0,15	1	0,5	12,2		0,04	0,03	
410	S41000	0,15	1	1	12,2		0,04	0,03	
416	S41600	0,15	1,25	1	13	--	0,04	0,03	0,6Mo
431	S43100	0,2	1	1	16	1,9	0,04	0,03	-
440A	S44002	0,67	1	1	17	--	0,04	0,03	0,75 Mo
416 PLUS	S41610	0,15	1	1	13	--	0,06	>0,15	0,6Mo

Taula 2. Tipus d'acers inoxidable (8).

Acers inoxidable endurits (per precipitació PH)

Aquest tipus d'acer inoxidable aquesta normalment constituït per la ja coneguda aliatge Ferro-Crom-Carboni (Fe-Cr-C), a més, d'elements com alumini, Niobi, Tàntal (Al, Nb, Ta). El seu enduriment es deu a processos com enduriment per deformació, per envelleiment i la reacció martensítica.

Distintos tipos de aceros inoxidable endurecidos por precipitación					
AIISI	NOMBRE COMERCIAL	%C	%Cr	%Ni	Otros
MARTENSÍTICOS					
635	Stainless W	0,07	16,5	6,8	0,5 mN/0,5 Si/0,4 Al/0,8Ti
630	17 - 4 PH	0,04	16,0	4,0	0,25 Mn/0,6 Si/3,2 Cu/0,25 (Cb+Ta)
----	15 - 5 PH	0,07	15,0	4,0	4,0 Cu/0,35 (Cb+Ta)
SEMI-AUSTENÍTICOS					
631	17 - 7 PH	0,07	17,0	7,0	0,6 Mn/1,15 Al
632	PH 15 - 7 Mo	0,07	15,0	7,0	2,20 Mo/1,15Al
633	AM - 350	0,10	16,5	4,3	2,75 Mo/0,10N
600	A286	0,08	15	26	1,3 Mo/0,3V/2,0Ti/0,35 Al/0,003B/0,4Si
----	17 - 10 P	0,12	17,0	10,0	0,75 Mn/0,6 Si/0,25 P
----	17 - 14 CuMo	0,12	16,0	14,0	3,0Cu/2,5Mo/0,5 Cb 0,25Ti/0,50Si/0,7 SMn

Taula 3. Tipus d'acers inoxidable endurits (9).

Acers inoxidable dúplex

Els acers inoxidable solen estar constituïts per crom (Cr) entre 18 i 26% i níquel (Ni) entre 4.5 i 6.5%. Es pot afegir nitrogen, molibdè, coure, silici i tungstè per a controlar el balanç en la configuració metal·logràfica i aportar certes característiques a la resistència a la corrosió.

Són magnètics. No poden ser endurits per tractament tèrmic, tenen una bona soldabilitat i, a més a més, la estructura dúplex millora la resistència a la corrosió de fractura sota tensions en ambients que contenen ions de clorur.

1.2.3. Avantatges i desavantatges de l'acer inoxidable

Avantatges

Explicació detallada

Resistència a la corrosió	Els acers de baix aliatge, resisteixen la corrosió en condicions atmosfèriques; els acers inoxidable altament aliats poden resistir la corrosió en la majoria dels medis àcids, fins i tot a elevades temperatures.
Resistència a la alta i baixa temperatura	Alguns acers resisteixen a grans variacions tèrmiques i mantindran altes resistències a temperatures molt altes, uns altres mostren una duresa excepcional a temperatures criogèniques.
Facilitat per a la fabricació	La majoria poden ser tallats, forjats, soldats i mecanitzats amb resultats satisfactoris.
Resistència mecànica	La característica d'enduriment per treball en fred d'alguns acers inoxidable s'utilitza en el disseny per reduir espessors i així, els costos. Uns altres poden ser tractats tèrmicament per a fer components d'alta resistència.
Estètica	Està disponible en moltes terminacions superficials. Es manté fàcilment donant com a resultat una alta qualitat.
Propietats higièniques	La facilitat de neteja el fa la primera opció en hospitals, cuines i instal·lacions alimentàries i farmacèutiques.
Cicle de treball	És durable, i és la opció més barata considerant el cicle vital.

Taula 4. Avantatges dels acers inoxidable (10).

Desavantatges:

- Es pot ratllar i abonyegar, i tots dos danys són difícils de treure o reparar.
- És sorollós.
- La seva tendència a ser un bon conductor de calor li impedeix ser tingut en compte per a molts processos industrials.
- El seu cost.

1.2.4. Nomenclatura

En la nomenclatura dels acers hi ha tantes formes diferents per designar un mateix acer com països i institucions relacionades a la seva fabricació i ús.

Restringint-nos només al sistema americà, són rellevants la influència d'institucions com ASTM (American Society for Testing and Materials), AISI (American Iron and Steel Institute), ASME (American Society of Mechanical Engineers), SAE (Society of Automotive Engineers), ANSI (American National Standards Institute), ACI (Alloy Casting Institute), AWS (American Welding Society) en la designació dels acers i les seves normes de fabricació per a diferents productes.

Per als acers inoxidable es fa servir el sistema AISI que utilitza un codi de tres dígits a vegades seguit d'una o més lletres. El primer dígit dona una pista de la classe d'acer. Sèrie 2xx i 3xx corresponen a acers austenítics. La sèrie 4xx inclou els acers ferrítics i martensítics.

El segon i tercer dígit no estan relacionats a la composició ni se segueix una seqüència (exemple 430 i 446 són ferrítics mentre que 431 i 440 són martensítics). Les lletres de sufix poden indicar la presència d'un element addicional o indicar alguna característica especial. Això es denota en la *Taula 5* (11).

Sufijo AISI	Sufijo UNS	Descripción
xxxL	xxx01	bajo carbono < 0.03% evita SCC
xxxS	xxx08	bajo carbono < 0.08%
xxxN	xxx51	nitrogeno agregado mayor resistencia
xxxLN	xxx53	bajo C < 0.03% + N agregado
xxxF	xxx20	mayor S y P mejor mecanizado
xxxSe	xxx23	Selenio mejor mecanizado
xxxB	xxx15	Si agregado evita descamado
xxxH	xxx09	Mayor contenido de carbono
xxxCu	xxx30	Cobre agregado

Taula 5. Avantatges dels acers inoxidable (11).

Sobre la base d'un determinat grau; AISI 420, per als martensítics; AISI 430 per als ferrítics, AISI 304 i AISI 316 per als austenítics i per als Austenoferrítics: AISI 201 i AISI 202; modificant un o diversos elements d'aliatge obtenim diferents graus dins el mateix grup aptes per millorar algunes propietats i / o usos.

1.3. Acers inoxidable austenítics metastables

En el diagrama de Schaeffler *Figura 6* podem observar que els acers austenítics de baix aliatge s'acosten a la cantonada inferior esquerra. Aquests al estar tan a prop de la regió martensítica són anomenats acers inoxidable austenítics metastables, ja que són susceptibles a la transformació martensítica sota l'acció d'una deformació. En canvi, els acers austenítics altament aliats al ser més estables no transformen en martensita durant la deformació (12).

Els acers inoxidable austenítics s'adapten molt bé a la fabricació de peces per a automoció ja que tenen un baix límit elàstic i una bona conformabilitat. A més, l'enduriment per deformació de l'austenita fa que incrementin la seva resistència mecànica després de ser deformats en fred. Així, després del conformat per mitjà de processos com l'estampació, el hidroconformat o la laminació, els components arriben a una elevada resistència, necessària per complir amb les normatives de seguretat enfront de xocs. En el cas particular dels inoxidable austenítics metastables, dels quals el EN. 1.4318 (AISI 301) és el més conegut, la deformació plàstica induïx la transformació d'austenita a martensita, factor que incrementa encara més el coeficient d'enduriment, donant lloc a un material amb una extraordinària capacitat d'absorbir energia en situacions d'impacte. A causa d'aquestes característiques, el grau 301 és un material molt utilitzat en la construcció d'estructures per a trens lleugers, xassís d'autobusos, estructures tipus bresca d'abella (honeycomb) i s'està estenent la seva ocupació en la indústria de l'automòbil per aquells components de la carrosseria susceptibles de suportar impactes, com ara el pilar o muntant (12).

El major inconvenient d'aquest tipus d'acer és que resulta difícil preveure les seves propietats mecàniques, ja que depenen de la quantitat de austenita que transforma durant el conformat les propietats canvien significativament.

1.3.1. Transformació martensítica

La transformació martensítica més habitual passa quan l'austenita (austenita- γ), amb estructura cristal·logràfica cúbica centrada en les cares (FCC), es transforma polimòrficament en una martensita (α -martensita), amb estructura cristal·logràfica tetragonal centrada en el cos (BCT). La cel·la unitat d'aquesta estructura cristal·logràfica és cúbica centrada en el cos (BCC) en la qual una banda s'ha allargat. Tots els àtoms de carboni es disposen en llocs intersticials en la martensita, formant una solució sòlida supersaturada que és capaç de transformar-se ràpidament en altres estructures si s'escalfa a temperatures en les quals la velocitat de difusió sigui apreciable.

En acers d'alt aliatge, la martensita pot adoptar una estructura diferent a la cúbica centrada en el cos o tetragonal, com és el cas dels acers aliats amb més d'un 15% de Mn i alguns acers inoxidable que posseeixen una martensita (ϵ -martensita) amb estructura hexagonal compacta (HCP).

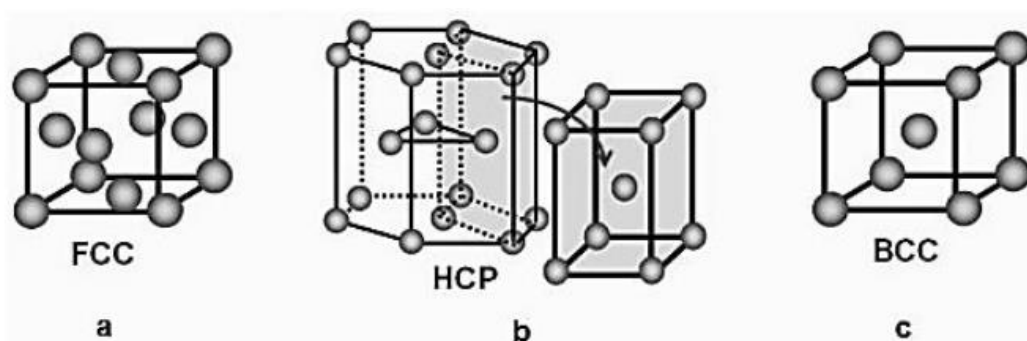


Figura 10. Estructures cristal·lines de la martensita: (a) austenita- γ ; (b) ϵ -martensita; (c) α -martensita (13).

Com la transformació martensítica no comporta fenòmens de difusió, aquesta passa gairebé de manera instantània mitjançant un mecanisme de cisallament i la nucleació i creixement de plaques de martensita a elevada velocitat a la matriu austenítica, és pràcticament independent del temps. La *Figura 11* mostra esquemàticament la transformació d'austenita a martensita per mitjà d'un cisallament.

Les fletxes indiquen les direccions de cisalla sobre els costats oposats del pla on es va iniciar la transformació. Es pot observar com el vidre de martensita format es desplaça per sobre i per sota de la superfície de l'austenita causa de l'aplicació d'una força de cisalla, així la superfície horitzontal original de l'austenita està rotada o inclinada a una nova orientació. Aquesta inclinació no es dona en transformacions difusionals ja que la superfície de la fase producte és paral·lela a la fase inicial. A la figura també s'observa que hi ha una deformació plàstica de l'austenita inicial. Eventualment, la compressió de l'austenita inicial limita l'ample de la nova placa de martensita, el que comporta que una nova transformació només pot donar-se mitjançant la nucleació de noves plaques. Si l'austenita inicial no fos una fase prou dúctil per acomodar la deformació produïda, podria produir-se un esquerpament en la interfase austenita / martensita. De fet, en materials ceràmics, la fase inicial no pot acomodar els canvis de forma i aquest tipus de transformacions han de ser evitades.

La martensita presenta de manera ideal una interfície plana amb l'austenita inicial. La zona central (plano "mid-rib") mostrada a la *Figura 11* és considerat generalment com el plànol d'inici de la formació de la placa de martensita (14).

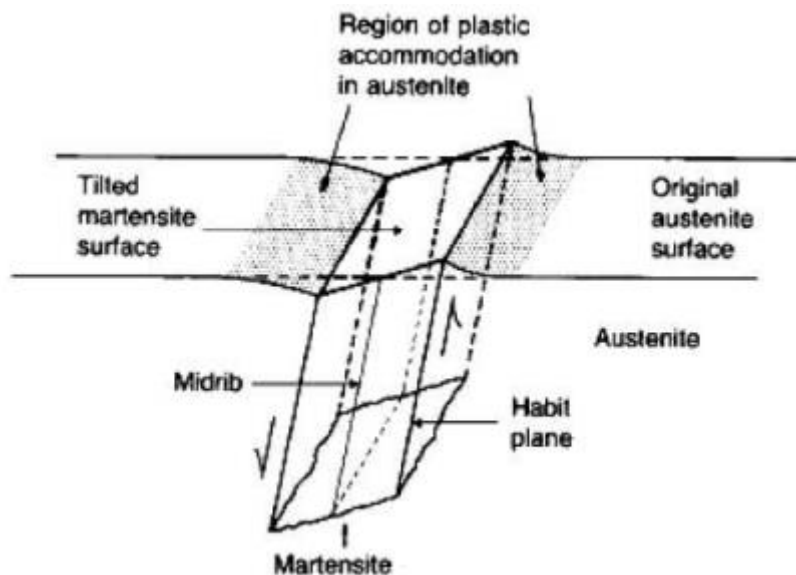


Figura 11. Diagrama de formació d'una placa de martensita (14).

Perquè es produeixi una transformació i es consideri martensítica ha complir-se les següents condicions:

- Ha de produir una deformació a la xarxa que doni lloc a un canvi macroscòpic de forma.
- El canvi d'estructura s'ha de realitzar mitjançant un moviment coordinat d'àtoms, sense difusió.
- L'energia de la deformació ha de dominar la cinètica i la morfologia de la transformació.

Les transformacions martensítics exhibeixen una varietat de comportaments geomètrics interrelacionats, a partir dels quals s'ha formulat una teoria cristal·logràfica fenomenològica, és a dir, que proveeix un mitjà de descobrir consistentment el què ha passat més que el com ha succeït realment. La teoria considera tres etapes bàsiques (15):

Deformació de Bain, 2. deformació que deixa la cel·la invariant, i 3. rotació de sòlid rígid a la xarxa transformada

1. La deformació de Bain és qualsevol deformació pura homogènia que converteix una xarxa en una altra per una simple expansió o contracció al llarg d'eixos ortogonals. Mentre que la cel·la producte pot formar-se a partir de la cel·la origen a través d'una deformació de Bain, no hi ha un pla sense distorsió que pugui associar-se amb el pla d'hàbit de la transformació. Per això s'introdueix, una segona deformació. Un exemple d'aquest tipus de deformació es mostra a la *Figura 12*.

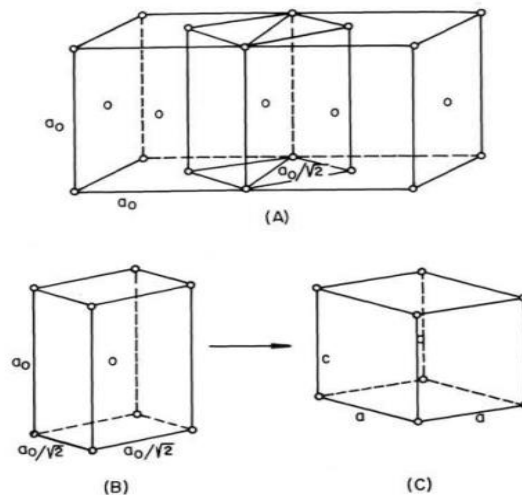


Figura 12. Deformació de Bain: canvi d'estructura de bct a bcc, (B) -> (C) (16).

2. Deformació invariant de la xarxa. aquesta deformació manté la simetria de la cel·la, i en combinació amb la deformació de Bain produeix un piano sense distorsió. Aquesta deformació és un cisallament pur i pot passar, bé per lliscament bé per maclat, la subestructura del pla d'hàbit serà diferent en els dos casos (Figura 13 i 14).

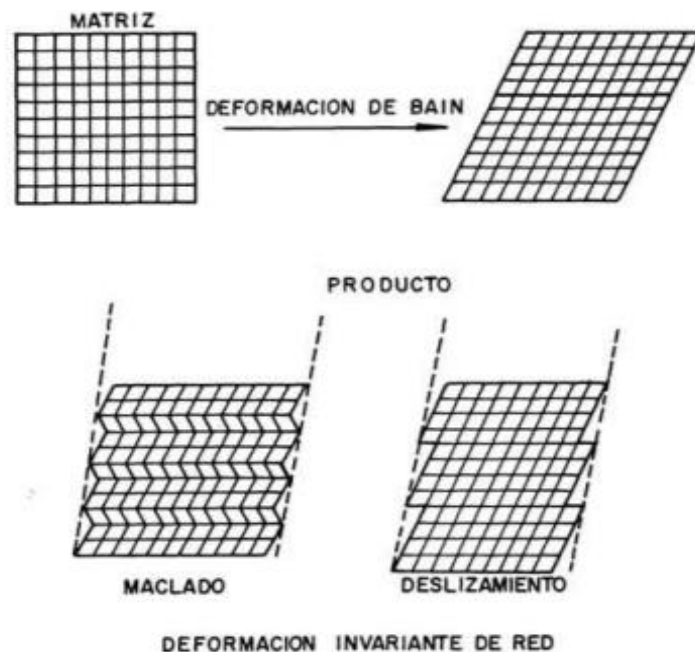


Figura 13. Deformació que modifica la estructura cristal·lina i deformació invariant de la estructura (16).

Els desajustos en la intercara origen / producte són mitigats periòdicament per les petites làmines lliscades o maclades. Així regions locals de la intercara són alternativament esteses i contretes, però a escala macroscòpica la intercara no té (de mitjana) distorsió.

3. Rotació de la xarxa transformada. Com el pla sense distorsió, conseqüència de les deformacions de Bain i invariant, difereix en orientació en les fases original i producte s'ha d'efectuar una rotació de l'estructura de la fase producte per assegurar la coincidència.

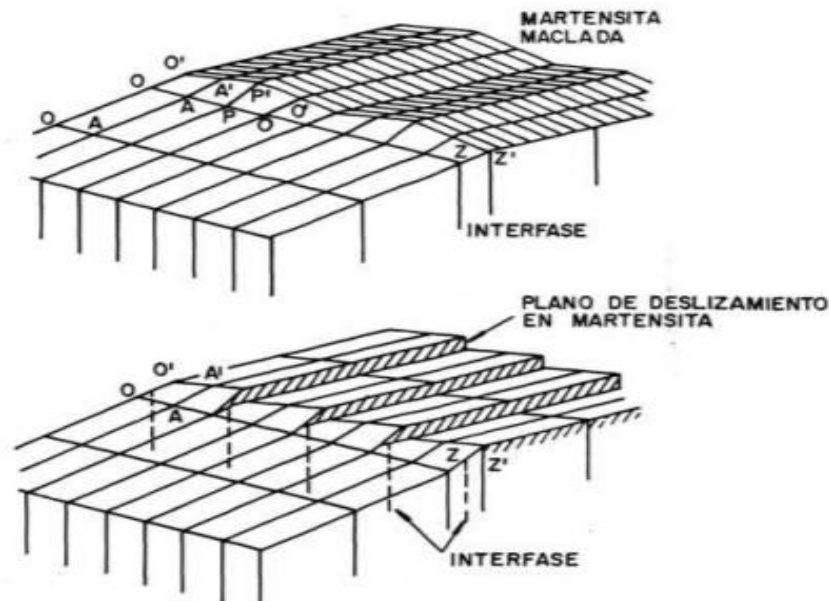


Figura 14. Representació dels dos tipus diferents de martensita maclada i desllaçada en relació amb la fase original (16).

Les transformacions martensítiques es caracteritzen per un pla d'hàbit que generalment no té índexs de Miller simples, i per una relació d'orientació en la que els plans i direccions de màxim empaquetament en les dues estructures són només aproximadament paral·lels (15) (16).

Transformació martensítica mitjançant un Trepmp

Com que la martensita és una fase de no equilibri, no es reflecteix en el diagrama de fases Fe-C. La transformació martensítica ve representada en un diagrama de transformació isotèrmica (Figura 12). La transformació comença en la temperatura anomenada M_s , que abasta un ampli rang de temperatures, des dels 500 °C fins per sota de temperatura ambient, depenent de la concentració d'elements estabilitzadors austenítics en l'aliatge. Una vegada que s'arriba a la temperatura M_s , la transformació s'inicia fins arribar a la temperatura final M_f . La temperatura M_s representa la força impulsora necessària per iniciar la transformació mitjançant cisallament des de la fase austenita a la martensita (17).

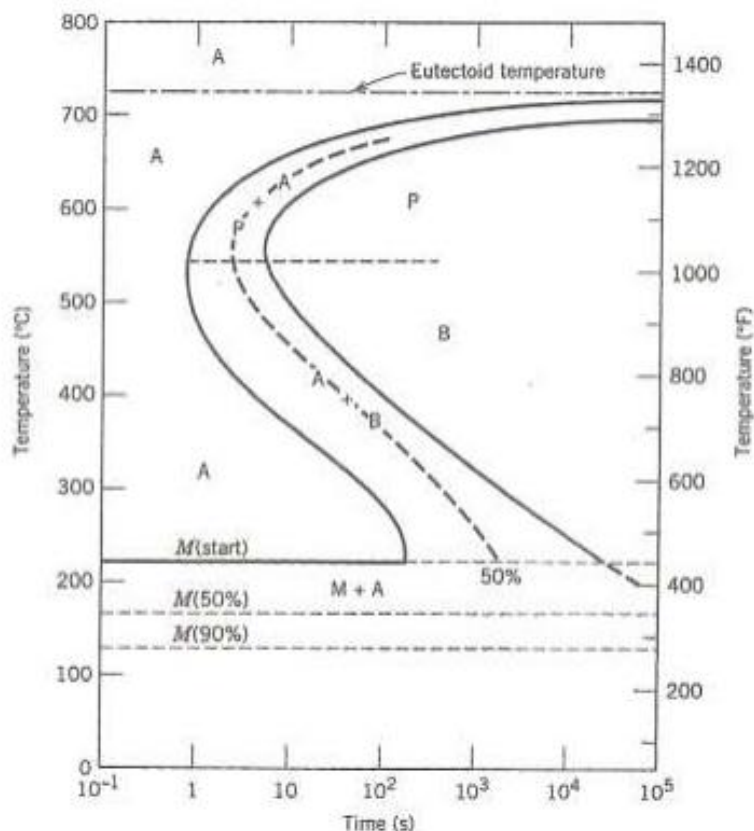


Figura 15. Diagrama de transformació isoterma d'un acer eutectoide: (A) austenita, (B) bainita, (P) perlita i (M) martensita (18).

No hi ha una temperatura de finalització de la transformació martensítica (M_t) com a tal, però se sol definir aquest punt com la temperatura a la qual s'ha completat el 95% de la transformació.

Per obtenir una bona transformació martensítica és necessari un refredament el prou ràpid perquè l'austenita metastable arribi a la temperatura M_s i s'inhibeixin les reaccions difusionals de la perlita, ferrita i bainita.

Tenint en compte el diagrama de transformació en refredament continu, la martensita només es forma a elevades velocitats de refredament en acers al carboni i de baix aliatge. A la majoria dels acers comercials se'ls afegeixen aliants per evitar la formació d'altres fases ja esmentades durant el refredament i que només es formi la martensita, per exemple en tremps en oli i aigua. A aquest procés se li denomina enduriment i es defineix com la capacitat de l'acer per a endurir durant un refredament ràpid.

Els elements aliants que s'afegeixen a l'acer tenen una clara influència sobre la temperatura d'inici de la transformació martensítica M_s i s'han desenvolupat nombroses equacions per relacionar la temperatura M_s amb la composició de l'acer.

Les següents equacions relacionen la temperatura d'inici de la transformació martensítica amb el contingut en pes d'elements aliants:

- Payson⁴⁴:

$$M_s (K) = 772 - 316,7C - 33,3Mn - 11,1Si - 27,8Cr - 16,7Ni - 11,1Mo - 11,1W$$

- Grange⁴⁵:

$$M_s (K) = 811 - 361C - 38,9Mn - 38,9Cr - 19,4Ni - 27,8Mo$$

- Steven⁵⁶

$$M_s (K) = 834,2 - 473,9C - 33Mn - 16,7Cr - 16,7Ni - 21,2Mo$$

- Andrews⁶⁵

$$M_s (K) = 812 - 423C - 30,4Mn - 12,1Cr - 17,7Ni - 7,5Mo$$

- Andrews⁶⁵

$$M_s (K) = 785 - 453C - 16,9Ni - 15Cr - 9,5Mo + 217C^2 - 71,5 (C)(Mn) - 67,6 (C)(Cr)$$

- Andrews⁵⁶

$$M_s (^{\circ}C) = 539 - 423C - 30,4Mn - 12,1Cr - 17,7Ni - 7,5Mo$$

- Apraiz⁶¹

$$M_s (^{\circ}C) = 500 - 350C - 40Mn - 35V - 20Cr - 17Ni - 10Cu - 10Mo - 5W + 15Co + 30Al$$

La presència d'elements aliants pot canviar significativament les posicions i formes de les corbes també en els diagrames de transformació isotèrmica. Els canvis poden ser desplaçaments cap a temps majors del nas de la transformació austenita-perlita i la formació d'un nas independent per a la formació de la bainita (19).

Transformació martensítica induïda mecànicament

S'ha parlat de la inducció de la formació de la martensita mitjançant temperatura, encara que també és possible fer-ho mitjançant l'aplicació d'un esforç extern sobre el material.

Així mateix, també hi ha la nucleació per efecte d'una deformació plàstica, en què aquesta produeix nous llocs de nucleació, el que succeirà a l'aconseguir l'esforç crític corresponent. A la *Figura 14* es mostra un resum de les possibilitats per a induir la martensita en el cas d'un esforç de tensió.

Quan no s'aplica cap esforç extern i la martensita s'indueix exclusivament per temperatura, aquesta es produeix de manera espontània a una temperatura M_s . Si augmentem la temperatura es necessitarà una tensió per induir la transformació, obtenint el que habitualment es diu martensita induïda mitjançant esforç. Quant més alta sigui la temperatura, més gran serà el esforç necessari per induir la transformació; el límit és M_s^σ , que és la temperatura màxima en la qual podem induir la martensita exclusivament mitjançant aplicació d'esforç.

Si la temperatura és més gran que aquest límit, en augmentar la tensió provocarem deformació plàstica en l'austenita (σ_d) el que facilitarà la inducció de martensita (és la zona en la qual es diu que la martensita s'indueix mitjançant deformació). El cas límit és M_d , a partir de la qual no podem induir martensita per esforç (20).

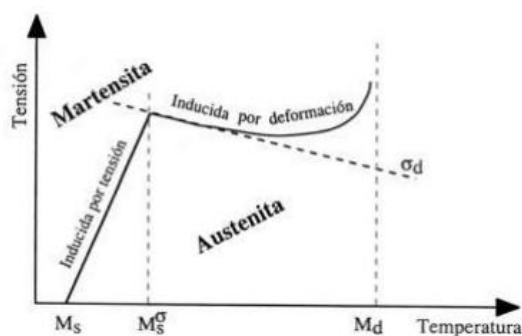


Figura 16. Esquema de les possibles formes d'induir la transformació en funció de la temperatura i de l'esforç extern (20).

1.4. Tècnica del Brunyit

La tècnica del brunyit és un procés de millora de l'acabat superficial per mecanitzat. Es poden classificar sota dos principis fonamentals, per arrencada de material o per deformació plàstica superficial. Els primers, coneguts com a processos abrasius, consisteixen en utilitzar una eina de tall o desbast per a la remoció del material aconseguint una rugositat mitjana (Ra) en un rang entre 0.05 micres i 1.60 micres. Entre ells es tenen, rectificat, lapidatge, polit, fresat de super-acabat, esmerilat, etc. Els segons, processos DPS com ara, el polit amb eina de diamant, impacte per làser, vibració ultrasònica, granallat i diversos tipus de brunyit, els quals utilitzen diversos elements (làser, ultrasò, vibració, corró, bola, granalla, etc.), per deformar plàsticament la superfície aconseguint la compressió d'una micro capa de material. A diferència dels processos per arrencada de material, els processos DPS són capaços no només de millorar l'acabat superficial, sinó també de diverses propietats mecàniques de les peces manufacturades, permetent allargar la seva vida útil al millorar la resistència al desgast, fatiga i corrosió.

Procés	Avantatges	Desavantatges
Brunyit amb bola	Millora la rugositat superficial, duresa i la resistència a la fatiga, desgast i corrosió.	Requereix d'eina mecànica o hidrostàtica.
	No genera ferritja sent un procés ambientalment més net.	
	Incrementa la vida útil de la peça.	Necessita refrigerant.
	Alta precisió dimensional.	
	Es pot incrementar la duresa inicial del material fins un 60%.	
Arrencada de ferritja	Millora la rugositat superficial.	Indueix esforç residual de tensió.
	S'utilitza una eina d'adquisició fàcil i econòmica.	Genera ferritja.
	No incrementa la duresa de forma considerable.	Procés d'acabat lent.
	Millora la duresa i resistència a la corrosió i al desgast.	Necessita refrigerant.
	Incrementa la vida útil de la peça.	Consumeix gran quantitat d'energia.
	Es poden aconseguir dureses 55 i 65 HRC	Procés de tractament lent.

Taula 6. Procés de millora de les propietats físico-mecàniques (21).

1.4.1. Brunyit amb bola

El brunyit amb bola és un procés DPS d'elaboració en fred, que ha demostrat induir una capa d'esforç residual més uniforme, amb més magnitud i profunditat, en comparació amb altres processos DPS, com ara el granallat i el brunyit vibratori. Tot i que el procés es coneix des fa més de tres dècades, és en els últims anys que s'ha incrementat la seva potencialitat com a procés d'acabat superficial i com a millora de diverses propietats físic-mecàniques, aconseguint una rugositat mitjana (R_a) per sota de 0.5 micres. El brunyit amb bola proveeix una alternativa a mètodes tradicionals per arrencada de material i tractament tèrmic, que a més de consumir una gran quantitat d'energia poden arribar a ser altament contaminants (21).

Per dur a terme el procés s'utilitza una eina anomenada brunyidor, la qual posseeix com a element deformant una bola d'alta duresa amb un diàmetre que varia de 3 a 12 mm, que generalment és de diamant sintètic, nitrur de titani o acer amb una alta resistència. La bola exerceix una força normal prou alta per produir una petita deformació plàstica, el que produeix un desplaçament de material dels pics a les valls de les micro irregularitats de la superfície, reduint la rugositat i aconseguint una micro capa de material comprimit amb una alta duresa superficial.

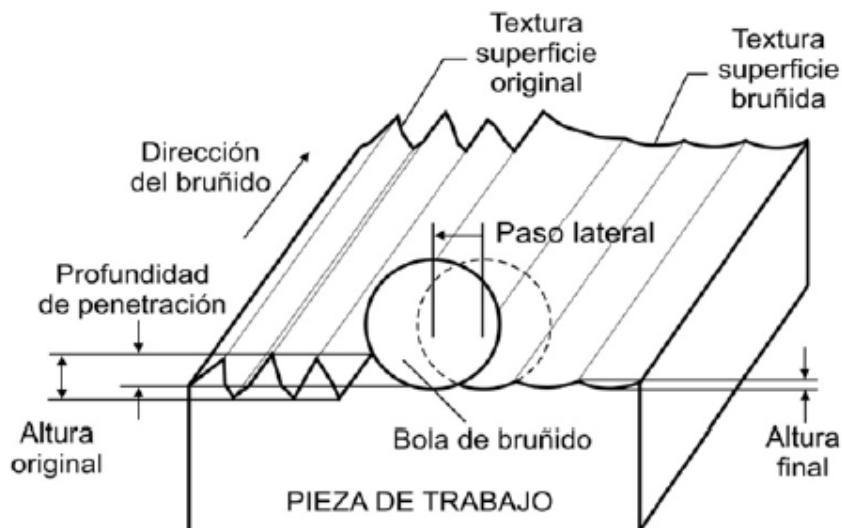


Figura 17. Diagrama esquemàtic del procés de brunyit amb bola (22).

A nivell industrial són utilitzats dos tipus de brunyidors de bola, que es classifiquen d'acord a la forma de sostenir la bola. La primera eina sosté la bola de forma mecànica, és suportada elàsticament per una motlle amb ressort que pot calibrar-se per compressió per generar la força normal requerida. La segona està basada en una motlle hidrostàtica on la pressió subministrada per una bomba hidràulica amb un dipòsit de taladrina (lubricant d'alt poder refrigerant) sosté la bola de forma hidrostàtica, proporcionant la força normal requerida per al procés. La bomba és capaç de bombar amb una pressió de fins a 40 MPa.

El principal desavantatge de l'eina de motlle amb ressort és que perd càrrega amb la carrera de la motlle, la qual cosa es resol amb els brunyidors de motlle hidrostàtica. Una gran part de les investigacions científiques enfocades al procés de brunyit amb bola, s'han centrat en estudis experimentals per determinar com paràmetres específics, com ara: força de brunyit, avanç, velocitat, diàmetre de bola, tipus de lubricant, material de la bola, nombre de passades, entre d'altres, influeixen en l'acabat superficial, duresa, rodonesa, desgast, esforços residuals de compressió, etc. Aquestes investigacions s'han enfocat principalment a estudiar la força de brunyit, l'avanç i la velocitat, demostrant que una combinació entre la força de brunyit i l'avanç proporciona una millora considerable en la rugositat i la duresa (21).

No obstant això, principalment per la força de brunyit, hi ha un valor límit, sobrepassant aquest límit es genera el deteriorament plàstic de la superfície produint una petjada de l'ample de contacte de la bola, i en lloc de millorar la rugositat, ocasionarà que aquesta s'incrementi.

El nombre de passades és un altre dels paràmetres d'estudi del procés que ha demostrat millorar considerablement la rugositat superficial i la duresa, a més de ser considerat com el segon factor amb més influència després de la força de brunyit. El nombre de passades es refereix al nombre de vegades que l'eina passa per la superfície de la peça de treball. Dos i tres passades es recomanen en el 70% dels estudis. Pel nombre de passades també hi ha un valor òptim, per dalt d'aquest valor, la rugositat en lloc de reduir també augmentarà. Aquest efecte s'atribueix a l'enduriment excessiu de la superfície a causa de la compressió, la qual produeix una descamació superficial de la peça.

Per mesurar la integritat de la superfície, la majoria de les investigacions es centren en l'estudi de la rugositat superficial i la duresa. El procés de brunyit amb bola, pot millorar la rugositat al disminuir-la en un rang de 40 a 90% mentre que la duresa superficial pot incrementar fins a un 60%.

1.4.2. Brunyit amb bola assistit per vibració

Assistir els processos de fabricació tradicionals, fent ús dels continus avenços que ofereix la tecnologia, és un dels grans reptes de la indústria moderna, ja que en paral·lel a l'optimització dels paràmetres crítics propis de cada procés, la introducció de làser, vibracions, polsos de corrent, entre altres recursos, contribueixen a facilitar l'execució dels processos de deformació plàstica en la majoria dels casos, sent possible disminuir paràmetres com la força necessària per a deformar, o possibilitant el treball amb materials més durs (22).

És especialment interessant referenciar el treball realitzat per D.E. Brehl i T.A. Dow (2007), en el seu article titulat Review of vibration-assisted Machining, on recullen seqüencial i organitzadament un bon grup d'informació vinculada amb les eines assistides amb vibracions. Ells plantegen que la mecanització assistida amb vibracions, VAM (Vibration Assisted Machining), combina les eines de mecanitzat de precisió amb l'amplitud d'una vibració mecànica, per millorar els processos de fabricació significativament. Els autors afirmen que el major èmfasi trobat sobre l'ús del VAM rau precisament en els avantatges de la seva aplicació en els procediments difícils, com pot ser el treball amb materials fràgils o la creació de microestructures amb geometries complexes, o en la producció de components d'alta precisió a escala macro, en aliatges durs com el titani (23). La majoria dels articles trobats i referenciats coincideixen que el VAM està associat a una notable reducció de les forces de mecanitzat, l'espessor de la ferritja si és el cas, que estan relacionades amb millora significatives en l'acabat superficial i en la vida útil de les eines emprades en els processos.

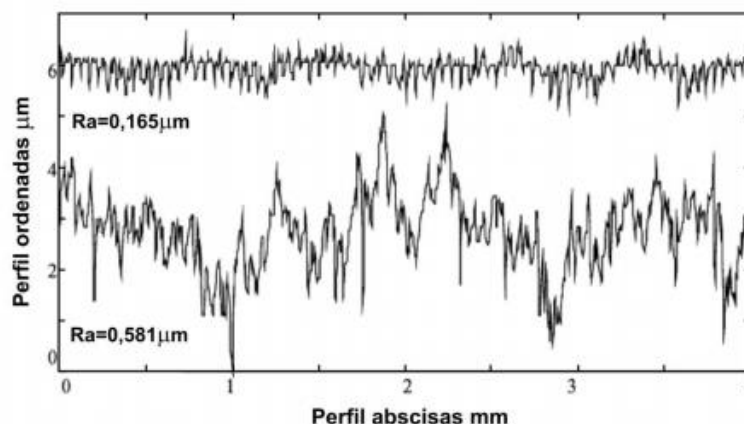


Figura 18. Gràfic comparatiu entre la rugositat superficial obtinguda com a resultat d'un tornejat convencional (a baix) i un assistit per ultrasons (a dalt) (23).

1.4.3. Eina de brunyir

Disseny i caracterització de l'eina de brunyir VABB

En aquest apartat es presenta el disseny mecànic de l'eina de brunyir estructurada en tres unitats funcionals diferents que treballen alhora per executar el procés. En aquest disseny, la funció del transductor piezoelèctric és fonamental per aconseguir el component vibratori de la força requerida pel procés de brunyit.

La alta freqüència i la baixa amplitud del moviment característic de la bola de brunyir comporta una notable dificultat tècnica. Per tant, tenim la necessitat d'utilitzar diferents tècniques per registrar i reconstruir la ona generada pel prototip ultrasònic. Aquests tests inclouen el control de moviment amb imatges HD, emissions acústiques i mesures dinamomètriques amb una alta freqüència de mostreig per garantir el funcionament de l'eina quan el piezoelèctric està excitat.

Construcció mecànica

El prototip està compost d'un motlle de compressió per controlar la pre-carga del brunyit i incorpora un sistema innovador de suport per a la bola de brunyir. Per executar correctament el procés de brunyit, el prototip ha de satisfer les següents especificacions:

- Ha de garantir el rodament constant de la bola de brunyir durant tot el procés.
- Controlar amb una certa fiabilitat la magnitud de pre-carga amb un motlle calibrat.
- Ha de permetre l'intercanvi de l'eina en màquines diferent.

L'eina de brunyir també té alguns requeriments addicionals com els següents:

- Separar tots els dispositius electrònics de l'interior de la màquina d'un ambient humit.
- Transmetre el moviment vibratori originat en el piezoelèctric a la bola de brunyir.

Més enllà dels aspectes mencionats, la característica principal que ha de satisfer l'eina és la de proporcionar una força de brunyir oscil·latòria (F_b), producte de la superposició dels dos components principals: la pre-carga (F_p), aplicada durant la fase preliminar de la operació de brunyit a través del control del motlle de compressió, i la força oscil·latòria (F_v), proporcionada per les vibracions de la pila del piezoelèctric. Durant el procés, la força actual de brunyir ha de ser el resultat de la composició d'ambdós, modificat per una variació no controlada deguda a la interacció de la bola amb les irregularitats de la superfície:

$$F_b = F_p + F_v + \eta \quad (\text{Eq. 1})$$

On η és la variació de la força de baixa freqüència deguda a les irregularitats topològiques trobades durant l'avanç de l'eina. Un cop considerats tots els requeriments tècnics, el disseny final està compost per tres unitats diferents (*Figura 19*). Conjuntament, els tres mòduls permeten regular la pre-carga, introduir el component vibratori en el sistema, i solapar i transmetre ambdós a la peça de treball. Es presentarà una descripció més detallada dels mòduls en els apartats següents.

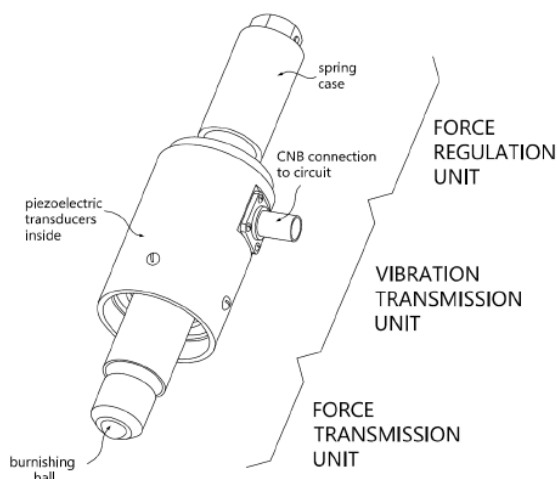


Figura 19. Estructura de l'eina de brunyir ultrasònica (24).

Unitat de regulació de la força

La unitat de regulació de la força està composta per les parts responsables de la selecció i control de la pre-carga (F_p), aplicada durant una operació de brunyit de la bola. Aquesta força és la principal responsable de la deformació plàstica durant ambdós processos, amb vibració (VABB) i sense vibració (NVABB). El motlle calibrat responsable del control de la força està situat dins d'una carcassa cilíndrica $\varnothing 25$ AISI 1045, que llisca lliurement al llarg d'una vareta, de manera coaxial cap al eix central de l'eina (Figura 20). La carcassa metàl·lica serveix alhora per fixar l'eina a la màquina subjectant-la al porta eines.

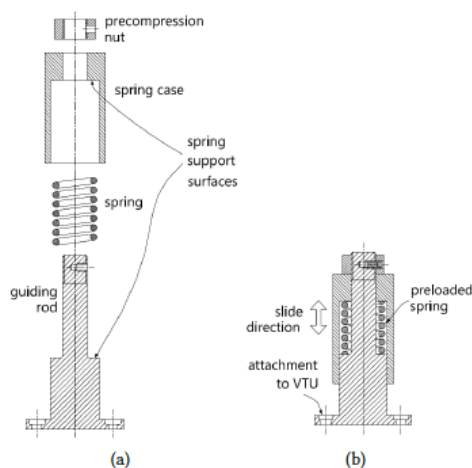


Figura 20. Representació esquemàtica de la unitat de regulació de la força: a) Vista explosionada; b) Parts acoblades i compressió del motlle (24).

La longitud de compressió experimentada pel motlle defineix la pre-carga del brunyit, així com la llei de Hooke (Eq. 2) és la que indica la força elàstica exercida pel motlle dintre la unitat. La compressió del motlle es possible degut a l moviment axial lliure en la seva carcassa, que l'espija convenientment de manera que la pre-carga pot ser regulada durant la operació de brunyit que la segueix. Un cop fixada l'eina al fus de la màquina, el capçal és apropat a la peça de treball fins que la bola fa contacte amb la superfície.

A partir d'aquest punt, l'avanç del capçal de l'eina es tornarà en compressió del motlle. Aquesta transmissió de la força es possible degut a la rigidesa de les connexions entre la base de la vareta i la carcassa del cos central de l'eina.

$$F_p = F_0 + k \cdot \Delta z \quad (\text{Eq. 2})$$

on F_0 és la força de pre-compressió, k és la tenacitat del motlle i Δz és la longitud de compressió del motlle.

Te una rigidesa nominal de 100 N/mm . Per a controlar la pre-carga amb precisió, es va realitzar una fase prèvia de calibrat per definir la rigidesa i la pre-carga actual del motlle. El prototip de l'eina va ser posada a prova a través d'una màquina de proves equipada amb una cèl·lula de carga de 2 kN . L'eina es recolzava en una part auxiliar que simulava el portaeines. Llavors la màquina de proves comprimia el motlle a una velocitat constant, mentre que la força era registrada per el dispositiu d'adquisició de dades Spider8, amb una freqüència de mostreig de 60 Hz (Figura 21).

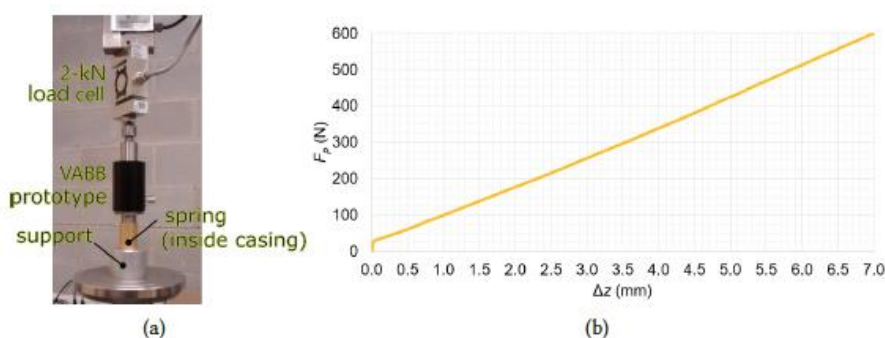


Figura 21. Calibrat del motlle del prototip VABB. a) Vista de la instal·lació experimental. b) Corba de calibrat obtinguda per compressió a una velocitat de 100 mm/min .

La sèrie de dades temporals eren transformades en desplaçament, així com la compressió es va realitzar a una velocitat constant (Figura 19). Aquesta operació de calibrat es va realitzar amb 3 velocitats de compressió diferents: 1 mm/min , 10 mm/min i 100 mm/min . Tot el conjunt de dades descriuen un gràfic lineal, com s'esperava degut a la llei de Hooke. Com a exemple, la Figura 21 mostra la corba calibrada per la prova de 100 mm/min .

$V_{comp} \text{ (mm/min)}$	$F_0 \text{ (N)}$	$k \text{ (N/mm)}$	R^2
1	30.33	83.12	0.9991
10	29.26	83.65	0.9999
100	28.31	84.34	0.9992

Taula 7. Calibratge dels paràmetres del motlle a diferents velocitats de compressió (24).

Les respectives línies resultants del calibrat eren calculades utilitzant un full de càlcul de Microsoft Excel. La coordenada que intercepta y correspon a la força de pre-compressió, deguda a la compressió inicial causada per la pressió exercida com a resultat de la rosca superior roscada a la base del suport.

Els resultats també mostren que la constant d'elasticitat actual del motlle k , té un valor de mitjana de $83.70 \pm 0.61 \text{ N/m}$, dins del interval ofert pel catàleg del proveïdor.

Per altre banda, degut a la varietat de forces de pre-compressions en funció de la longitud d'enroscat del cargol, les operacions de calibratge van realitzar-se prèviament a tots els assajos experimentals per a verificar el seu valor.

Unitat de transmissió de la força

La funció assignada en aquest mòdul és la execució de la força de brunyit F_b , recobrint i transmetent ambdós la pre-carga controlada a través de la unitat descrita prèviament i la força d'oscil·lació causada per la unitat presentada en el següent apartat. El transmissor mecànic final d'aquesta força és la bola de brunyir, la qual està recolzada en uns rodaments formats per petites esferes dins d'una guia en el capçal de l'eina (*Figura 22*). Aquest capçal és realment la extensió de la fina superfície del suport en el qual els discs dels piezoelèctric estan subjectats. La segona funció és la de amplificar l'amplitud de vibració del piezoelèctric des del extrem, per on és fixat (25).

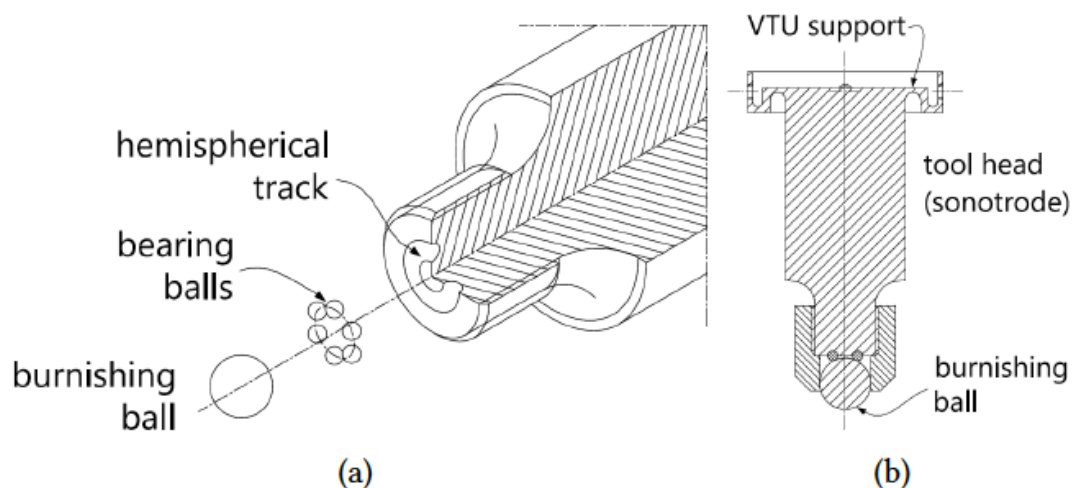


Figura 22. Representació esquemàtica de la unitat de transmissió de força. a) Detall dels rodaments i la guia mecanitzada. b) Secció de l'asseblatge dels components del FTU (25).

Unitat de transmissió de la vibració

Aquest mòdul es compon dels elements necessaris per generar el component ultrasònic vibratori de la força de brunyit, F_v . Les especificacions dissenyades que descriuen la força que aquesta unitat hauria de poder aportar es poden veure a la *Taula 8*.

item	value
Frequency	40 kHz
Amplitude (unloaded tool)	10µm

Taula 8. Especificacions dinàmiques imposades pel prototip VABB (25).

El principi en el qual es basa la generació de la F_v és en el canvi de l'espessor del material piezoelèctric polaritzat quan aquest està subjecte a un diferencial de potencial. Aquests transductors piezoelèctrics es deformen en conseqüència a la freqüència emesa pel camp elèctric que l'excita. Aquest és el principi sobre el qual es basa aquest VTU, així com també es basa en anteriors aplicacions exitoses sobre eines de mecanitzat assistides per vibració.

Aquest disseny contempla la instal·lació del transductor piezoelèctric dins d'un recipient tancat juntament amb el corresponent contrapès.

Aquesta part es fixa en una superfície prima estesa a la part superior del sonotrode, amb la finalitat d'assegurar la connexió amb el FTU. A la part superior d'aquest recipient trobem cargolat el suport del motlle i el conjunt FRU descrit anteriorment. L'excitació elèctrica de la transmissió vibratòria unitària és generada per l'aparell extern A CNB, el qual connecta els elèctrodes entremig dels discos piezoelèctrics i el circuit electrònic.

El FRU explicat anteriorment fa referència a la força estàtica donada per l'eina a través de la compressió del motlle. Tot i així, aquest prototip es caracteritza per tenir l'habilitat de transmetre un moviment vibratori a la bola de brunyit, això és possible gràcies a un conjunt de parts ceràmiques piezoelèctriques unides juntament a la bola de brunyit. El principi de la piezoelectricitat justifica i explica el comportament de l'eina i el seu potencial per implementar el procés del VABB.

Piezoelectricitat com a font de vibracions

La piezoelectricitat consisteix en la macropolarització del material com a resultat de la creació dels micropols que sorgeixen del trastorn en la microestructura. La magnitud que representa com s'estén la polarització ocorreguda es el vector polarització P_p (Eq. 3), la seva direcció defineix l'eix de la polarització i està orientat segons la connexió entre el pol positiu i negatiu.

$$P_p = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum P_\mu}{\Delta V} \quad (\text{Eq. 3})$$

On ΔV és el volum finit del material, i P_μ es el vector de polarització microscòpic.

En condicions normals, un material piezoelèctric és neutral. Quan s'aplica una força externa els àtoms es desplacen i la molècula neutral original es transforma en un microdipol. Un efecte afegit dels micropols en el volum piezoelèctric comporta una polarització total. Aquest és l'efecte directe piezoelèctric representat a la Figura 23.

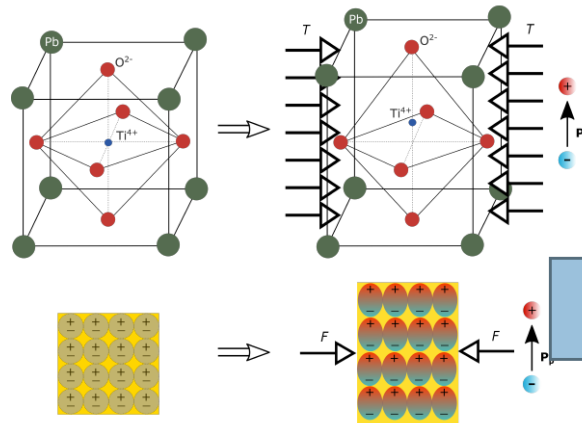


Figura 23. Efecte piezoelèctric directe: des de la micropolarització (inferior) fins la macropolarització (superior). Esquerra: Inicialment, la molècula PZT és neutral, com generalment ho és. Dreta: Quan s'aplica una força externa, les molècules són sotmeses a una pressió T i el material es polaritza (25).

A més de l'efecte directe piezoelèctric, un efecte invers piezoelèctric pot ser observat en aquest tipus de materials, un cop han estat prèviament polaritzats per l'acció directa d'una força (Figura 24). Està modificat per una proporcionalitat entre l'esforç sofert pel material piezoelèctric neutral, ε_p , quan està sotmès a un camp elèctric, E , i la magnitud d'aquest camp. Ambdós factors són proporcionals l'un amb l'altre (Eq. 4). Aquest efecte invers piezoelèctric és la teoria base dels actuadors piezoelèctrics fabricats.

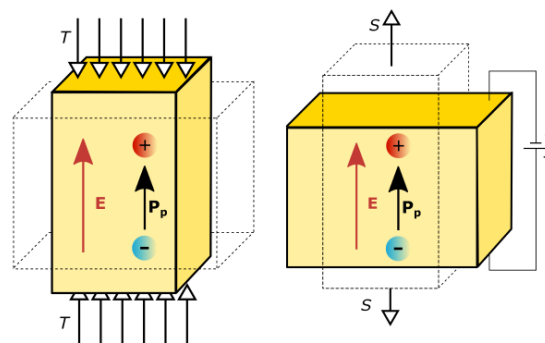


Figura 24. Esquerra: Efecte directa piezoelèctric. Dreta: Efecte invers piezoelèctric. La línia discontinua indica el canvi geomètric causat per l'aplicació d'una pressió o d'un camp elèctric, respectivament (25).

$$\varepsilon_p \propto E \quad (\text{Eq. 4})$$

La possibilitat d'aparellar ambdós efectes és el que explica la capacitat de la piezoelectricitat per transformar energia elèctrica en energia mecànica, la qual es el principi en el que es basa aquesta eina VABB.

Configuració dels discos piezoelèctrics

La configuració resultants dins del prototip de la bola de brunyir consisteix en un conjunt de quatre discos piezoelèctrics PZT8 apilats l'un sobre l'altre. Aquests discos estan separats per elèctrodes metàl·lics connectats alternativament a una font de tensió oscil·lant. Aquesta distribució permet una actuació axial dels sistemes, sempre que estiguin excitats per un camp elèctric alineat amb la direcció de polarització.

Aquesta configuració és una clàssica solució d'enginyeria que presenta una eficàcia molt alta en transformar electricitat en energia mecànica, entregant exitosament una vibració vertical a la bola de brunyit. També permet una freqüència de ressonància amb una magnitud elevada del sistema, la qual es apropiada per una excitació ultrasònica desitjada pel prototip.

L'apilament es fixa a una fina superfície a la part superior del "sonotrode" del FTU, d'aquesta manera permet el funcionament conjunt d'ambdues unitats, tal i com s'ha explicat anteriorment. A la *Figura 25* es pot observar la connexió del VTU-FTU. L'apilament piezoelèctric és excitat mitjançant una connexió a un generador extern el qual transforma la senyal elèctrica en un voltatge AC monofàsic de 40 kHz i 1,3 kV.

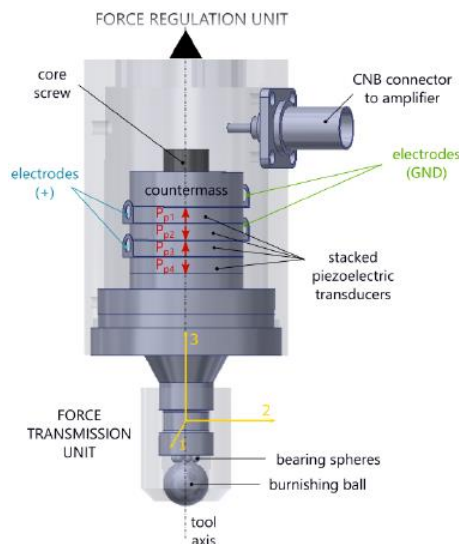


Figura 25. Plats piezoelèctrics apilats dins del VTU del prototip VABB (25).

2. Procediment experimental

2.1. Material estudiat

El material estudiat és l'acer austenític metastable A 1.4318 (AISI 301LN), subministrat en quatre condicions diferents de recuit i de deformació en fred, que són conegudes comercialment com 2B, C850, C1050 i C1250. Per facilitar l'estudi s'ha establert en la memòria una nomenclatura per a cada tipus (*Taula 9*).

Tipus d'acer	Designació comercial	Nomenclatura	Condicció
EN 1.4318 (AISI 301LN)	2B	R	Recuit
	C850	L10	Deformació en fred 10%
	C1050	L20	Deformació en fred 18%
	C1250	L40	Deformació en fred 38%

Taula 9. Acers austenítics inoxidable metastables estudiats.

L'acer ha estat subministrat per l'empresa belga OCAS NV, Arcelor-Mittal R&D Industry Gent, en forma de xapa d'1,5 mm d'espessor. Per tal d'obtenir les mostres s'ha tallat la xapa en forma de quadrats de dimensions 10x10 mm.

2.1.1. Composició química

En la *Taula 10* podem observar la composició química en % en pes d'aquest acer. Aquesta composició el classifica com un acer inoxidable austenític.

C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	N
0,015	17,36	7,18	0,55	1,68	0,23	0,1

Taula 10. Composició química de l'acer estudiat (%).

2.1.2. Microestructura

L'acer recuit (O) té una composició d'austenita a la seva microestructura que no superen el 3%. Els grans austenítics tenen una estructura cristal·logràfica FCC (Fe- γ) amb una mida de gra de $11.66 \pm 4.35\mu\text{m}$ (Figura 26) (24).

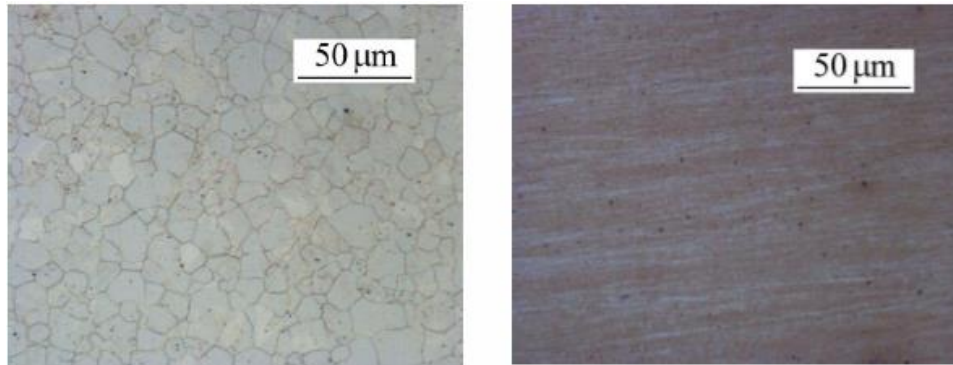


Figura 26. Esquerra: Fase Austenítica de l'acer recuit (O) (24); Dreta: Fase Martensítica de l'acer recuit (O) (24).

El primer acer deformat en fred (L10) presenta una microestructura amb un percentatge inicial de martensita del 10%. Els grans austenítics tenen una mida de gra de $8.55 \pm 3.74\mu\text{m}$ (Figura 27) (24).

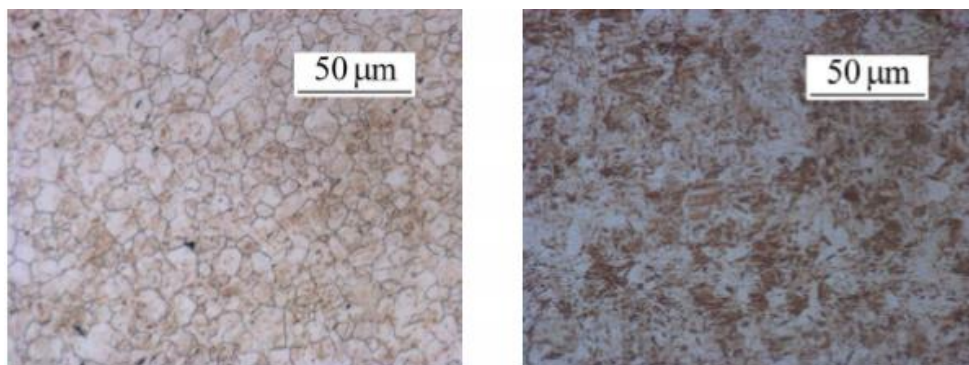


Figura 27. Esquerra: Fase Austenítica de l'acer laminat en fred (L10) (24); Dreta: Fase Martensítica de l'acer laminat en fred (L10) (24).

El segon acer laminat en fred (L20), presenta, com bé indica la seva nomenclatura, un percentatge inicial de martensita del 18%. Els grans d'aquesta fase austenítica tenen una mida de $9.05 \pm 4.21\mu m$ (Figura 28) (24).

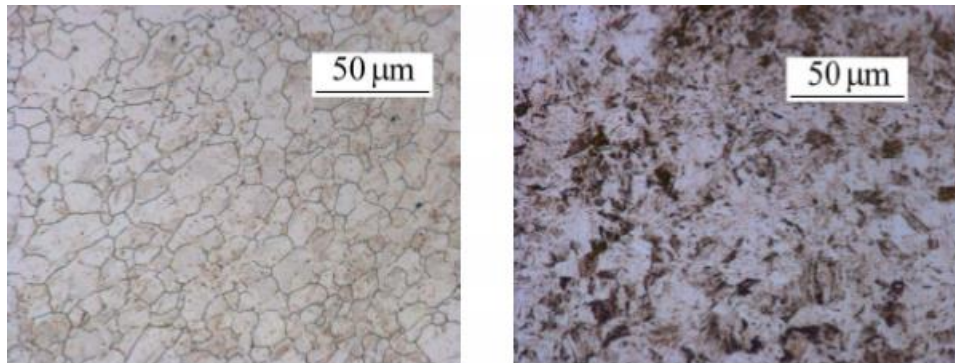


Figura 28. Esquerra: Fase Austenítica de l'acer laminat en fred (L20) (24); Dreta: Fase Martensítica de l'acer laminat en fred (L20) (24).

Per acabar, l'últim acer laminat en fred (L40) presenta percentatges de martensita inicial del 38%. Afegir que l'estructura cristal·logràfica de la martensita és BCC (Fe- α') en tots els casos i no s'observa la presència de martensita- ϵ . Els grans d'aquesta fase austenítica tenen una mida de $9.24 \pm 4.19\mu m$ (Figura 29) i estan lleugerament orientats en la direcció del laminat (24).

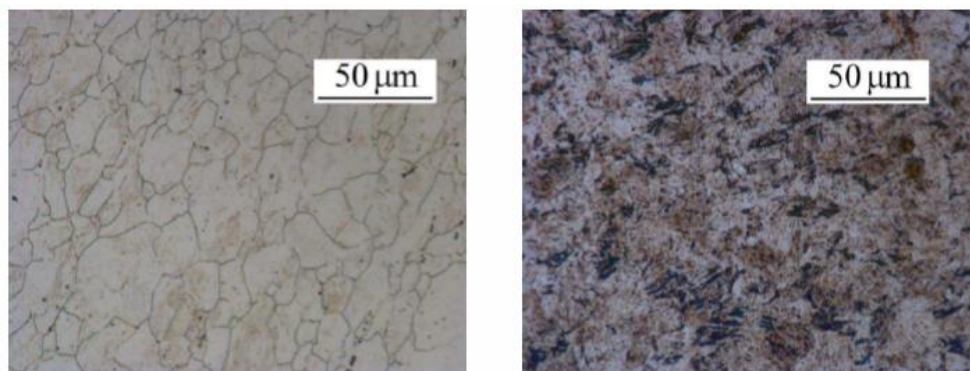


Figura 29. Esquerra: Fase Austenítica de l'acer laminat en fred (L40) (24); Dreta: Fase Martensítica de l'acer laminat en fred (L40) (24).

2.1.3. Propietats físiques

L'acer inoxidable EN 1.4318 (AISI 301LN) en estat de recuit no és magnètic, però un cop deformat en fred (J, K i L) aquest acer es torna magnètic a causa de la transformació martensítica produïda en aquest. Les propietats físiques de l'acer inoxidable austenític metastable 301LN es poden observar a continuació en la *Taula 11*:

Densitat [Kg/dm ³]	Mòdul de Young [GPa]	Coefficient d'expansió tèrmica [10 – 6 · K – 1]	Conductivitat Tèrmica [W/(m·K)]	Calor específic [J/(kg·K)]	Resistivitat elèctrica [(Ω·mm ²)/m]
7.844	200	16.5 - 17.5	15	500	0.73

Taula 11. Propietats físiques de l'EN 1.4318.

2.1.4. Propietats mecàniques

Les propietats mecàniques de l'acer EN 1.4318 es veuen significativament influenciades per la deformació en fred i la conseqüent transformació martensítica degut a que l'acer mostra major resistència a la tracció i un increment de la duresa i, per contra, la disminució de la ductilitat (*Taula 12*) (26).

Tipus d'acer	Límit elàstic [MPa]	Resistència a la tracció [MPa]	Allargament [%]	Duresa HV10
Acer recuit (2B)	360	902	60	240
Acer laminat (C850)	650	967	38	300
Acer laminat (C1050)	926	1113	25	400
Acer laminat (C1250)	1148	1173	20	436

Taula 12. Propietats mecàniques de l'EN 1.4318.

2.2. Metodologia

Per a la realització de les condicions de treball de les mostres i el seu posterior estudi del efecte del brunyit sobre aquest acer s'ha seguit una llista de passos des de l'elaboració de la mostra fins a l'obtenció dels resultats de les proves per tal d'obtenir els millors resultats possibles. La metodologia marcada ha sigut la següent:

1. Realitzar una sèrie de línies de brunyit de diferents condicions a les làmines d'acer recuit i deformat en fred per tal d'obtenir una lleugera idea del material estudiat, conèixer quins factors del procés de brunyit afecten més al material i com afecten aquests. Aquest estudi previ a la elaboració de les mostres s'ha realitzat segons s'explica en l'apartat 2.3.
2. Realitzar amb l'eina de brunyir les petjades a estudiar, una per a cada condició de brunyit diferent.
3. Tallar l'acer sobrant de les mostres amb la Talladora Accutom-50, netejar-les en bany d'ultrasons i finalment marcar-les tal com s'indica en l'apartat 2.4.
4. Observar, fotografiar i comparar les diferents petjades produïdes en diferents condicions de brunyit sobre les làmines d'acer amb el microscopi Confocal.
5. Observar, fotografiar i comparar les diferents petjades produïdes en diferents condicions de brunyit sobre les làmines d'acer amb el microscopi electrònic de rastreig (SEM).
6. Mesurar el perfil de les petjades amb l'interferòmetre així com s'indica en l'apartat 2.5.4.
7. Mesurar la rugositat superficial de les petjades amb el rugosímetre, tal com s'indica en l'apartat 2.5.1.
8. Tallar les petjades per la meitat en direcció perpendicular amb la ciselladora, per tal de poder produir microindentacions més endavant.
9. Encastar les mostres en baquelita.
10. Polir les petjades encastades tal com s'indica en l'apartat 2.4.
11. Realitzar microindentacions mitjançant el microduròmetre.

2.3. Selecció de les variables del procés de brunyit

Abans de realitzar les petjades per a estudiar el comportament de l'acer AISI 301 LN, s'haurà de fer un estudi previ per a conèixer aquest acer en qüestió. Per a caracteritzar el comportament d'aquest acer, en les condicions de laminat en fred amb un contingut de 10% de martensita (L10), un contingut de 18% de martensita (L20), un contingut de 38% de martensita (L40) i en les condicions de recuit (R) s'han realitzat 8 mostres compostes per una franja de ratlles a cada placa amb l'eina de brunyir, en diferents condicions. Cada franja està composta per 5 ratlles, deixant un espai de 5 mm de distància entre elles, realitzades amb cinc forces diferents: 100, 200, 300, 400 i 500 N. Dos de les quatre franges s'han realitzat amb l'eina de brunyir amb vibració, una d'elles orientada en la direcció del laminat i l'altre amb direcció perpendicular al laminat. Les franges fetes amb l'eina de brunyir sense vibrar, mantenen les direccions prèvies al brunyit amb vibració, una orientada a la direcció del laminar, mentre que l'altre està orientada perpendicular al laminat. El brunyit s'ha realitzat a una freqüència de 40 kHz i una amplitud del 100% (10 micres).



Figura 30. Realització de les franges per a caracteritzar el comportament de la placa L20

Un cop finalitzades les petjades amb totes les condicions en les diverses làmines, s'ha utilitzat un rugosímetre per a realitzar la lectura de les franges realitzades a la superfície del material.

El rugosímetre emprat per a l'estudi de les petjades utilitza la llum com a eina de lectura superficial, el qual en funció de com reflecteixi la llum en la superfície de l'acer, és capaç de representar gràficament la silueta de la superfície amb el programa Surface Map. Posteriorment, amb la informació obtinguda amb el Surface Map, s'han mesurat amb el programa SPIP dades com la amplitud i profunditat de petjada o l'alçada dels apilaments que es produïen en els laterals de les petjades.

D'altra banda, el SPIP ens ofereix la possibilitat de conèixer més informació sobre les mostres com pot ser la rugositat superficial de les petjades. Finalment s'han realitzat 10 assajos per mostra per tal d'obtenir resultats més fiables.

Alhora de desar aquestes dades, s'ha estipulat una nomenclatura concreta per tal de que es detalli bé tota la informació que conté cada mostra degut a la gran quantitat d'informació de dades que es disposa i d'aquesta manera agilitzar l'ús d'aquestes.

A continuació es mostra la nomenclatura escollida amb cadascun dels seus significats detallats:

- **R/L10/20/40_AV/SV_TOTES_L/P:** On L/R indiquen si el laminat s'ha realitzat en condicions de recuit (R) o laminat en fred (L), el 10, 20 i 40 representen el % de contingut de martensita, els acrònims AV i SV indiquen si el brunyit s'ha realitzat amb vibració o sense vibració, TOTES vol dir que les 5 ratlles de cada mostra es realitzen amb una sola lectura del rugosímetre i finalment, L i P indiquen si el brunyit s'ha realitzat en la direcció del laminat o perpendicular a aquesta.

2.3.1. MiniTab

En un principi es tenia pensat fer una caracterització prèvia només de les làmines L10 i L20 però, apart de la caracterització les làmines L10 i L20 en les condicions exposades prèviament, s'han realitzat per una altra banda mesures en làmines R (condició de recuit) i L40 (condició de laminat en fred amb un 40% de martensita) amb unes mostres en les mateixes condicions que les làmines L10 i L20 per tal d'obtenir una caracterització de l'acer AISI 301 LN més contrastada.

S'ha decidit estudiar i comparar només la influència de les diferents condicions de brunyit respecte les alçades mesurades en les petjades ja que la amplada d'aquestes mostra un comportament molt similar al de la alçada però amb influències menys significatives respecte les condicions de brunyit.

Per a dur a terme aquesta comparació s'ha utilitzat el MiniTab. És un programa d'ordinador dissenyat per executar funcions estadístiques bàsiques i avançades. Amb aquest programa, un cop introduïdes totes les dades obtingudes de les mostres en totes les seves condicions, es poden obtenir gràficament les interaccions de cada condició de brunyir entre elles respecte l'alçada de les petjades.

2.3.2. Selecció de les característiques de les noves mostres

Un cop caracteritzat el material, s'han pres les següents decisions de cara a la realització de les noves petjades a analitzar:

- S'ha decidit fer les mostres de 10x10 mm mantenint les dos condicions de vibració (SV i AV) ja que tot i no presentar variacions a nivell superficial, pot mostrar diferències a nivell microestructural.
- Pel que fa a les forces de brunyit, com que descriuen una relació lineal aplicarem només la força de 500 N, degut a que és on s'obtenen els resultats més significatius. Com que existeix una lleugera influència en la realització de les passades en direcció laminar o perpendicular al laminat, mantindrem aquesta condició per a realitzar les noves petjades.
- Es realitzaran les petjades en les condicions esmentades prèviament amb una nova condició: la petjada serà realitzada amb una sola passada i amb cinc passades.
- S'utilitzarà una nova nomenclatura que inclourà noves característiques:
R/L10/L20/L40_AV/SV_L/P_1P/5P
On 1P/5P indicarà si la petjada de brunyit s'ha realitzat amb una o cinc passades.

2.4. Preparació de les mostres

Un cop finalitzada la caracterització prèvia del material, s'han realitzat les noves mostres a analitzar. Aquestes noves mostres estan formades per petjades produïdes amb l'eina de brunyir mantenint les condicions esmentades en l'apartat 2.3.2.

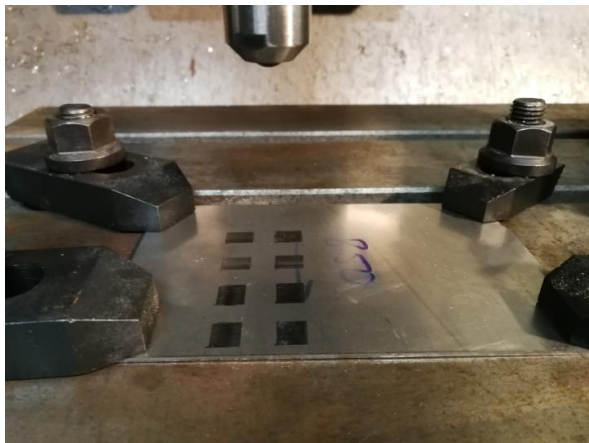


Figura 31. Imatge de les noves petjades produïdes amb l'eina de brunyir sobre la làmina L10.

El següent pas és tallar-les amb la talladora, separant de les nostres petjades tot l'acer residual per tal de facilitar l'estudi d'aquestes noves mostres alhora d'emprar eines d'anàlisi. Aquest equip (Figura 32) permet tallar amb precisió les mostres amb un disc de diamant que gira a 5000rpm amb una velocitat d'avanç de 0.015mm/s.



Figura 32. Fotografia de la Talladora Accutom-50 utilitzada per a eliminar l'acer sobrant de les mostres.

Un cop tallades les mostres, s'ha utilitzat una màquina de neteja per ultrasons Selecta (Figura 33) amb l'objectiu d'eliminar totes les impureses que poden haver-se quedat a la superfície de les petjades. Per a que la neteja sigui correcte, s'han submergit les mostres en un recipient de vidre amb acetona i aquest romandrà 15 minuts dins de la màquina de neteja per ultrasons. Per tal d'evitar que ens pugui entrar noves impureses a la superfície de les petjades, aquest procés s'ha realitzat prèviament a l'estudi de diferents assajos tenint en compte també situacions on ha sigut important obtenir imatges i fotografies clares de la superfície de les mostres, com el cas del microscopi òptic de rastreig (SEM) o el microscopi Confocal.



Figura 33. Fotografia de la màquina de neteja per ultrasons.

Just després de la neteja, i sense perdre la referencia de les nostres mostres, aquestes s'han desat en bossetes de plàstic transparent on s'indica en retolador permanent les diferents condicions de brunyit de les mostres guardades dins com es pot veure en la *Figura 34*.



Figura 34. Fotografia de les bossetes de plàstic per guardar les mostres.

Com es pot veure, la identificació de les mostres en les bossetes de plàstic segueix la nomenclatura establerta en l'apartat 2.3. La nova condició de brunyit que depenia de si la petjada està realitzada en una o en cinc passades s'indica en la mostra mitjançant un punt sobre les petjades realitzades amb una sola passada al revers de la mostra. D'aquesta manera podem mantenir les nostres mostres ben controlades i al marge del perill de ser ratllades.

Un cop netejades les mostres i marcades adequadament, hem utilitzat la ciselladora (*Figura 35*) per tallar-les per la meitat, en direcció perpendicular al brunyit, per tal de poder estudiar posteriorment les propietats mecàniques de la nova superfície de l'acer brunyit (*Figura 36*).

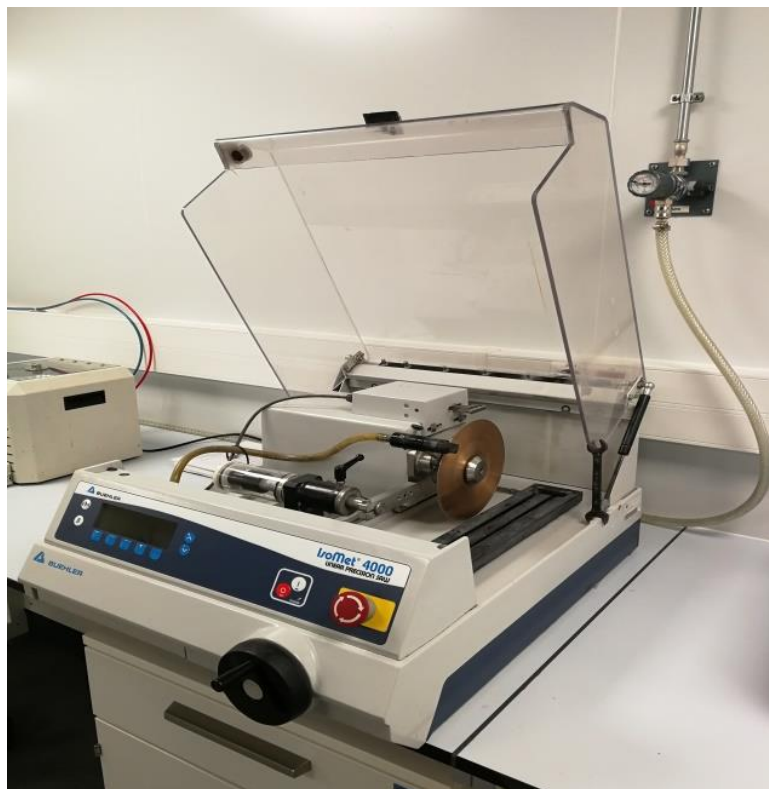


Figura 35. Fotografia de la ciselladora.



Figura 36. Mostres L10_AV/SV_L/P de 5 passades un cop tallades amb la ciselladora.

Per tal d'evitar que la cisalla tingui influència en la microestructura de l'acer i, per tant, tingui un efecte negatiu sobre l'estudi de les propietats de l'acer que s'analitzaran més endavant, s'han utilitzat els valors dels paràmetres de tall de la ciselladora recomanats pel fabricant (*Figura 37*) en funció del material que es desitja tallar.

Material de la mostra	Tipus de disc de tall	Concentració de diamant	Velocitat (rpm)	Temps de tall estimat (min: seg)	Velocitat d'avanç (mm/min)
Bronze	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Fundició gris	Serie 15HC, diamant o	Alta	2500	3:30	3mm
	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Hastelloy	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Magnesi	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Plàstics	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Acers inoxidable	Disc de tall fi ISOCUT o	-	4000	2:00	6mm
	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Titani	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Paletes de turbines de base ferrosa	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Paletes de turbines de titani	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm
Cinc	Disc abrasiu 11-4217	-	4000	1:15	10mm

Figura 37. Valors dels paràmetres a introduir a la ciselladora en funció del material a tallar.

Més endavant s'avaluarà la duresa de la superfície de la petjada de brunyit mitjançant un conjunt de microindentacions. Per aquest motiu, amb l'objectiu de treballar en les millors condicions possibles, s'ha encastat una de les meitats de cada mostra amb baquelita DuroFast Struers (*Figura 38*). Per a encastar les mostres, s'ha utilitzat un temps d'escalfament de 4 minuts i un temps de refredament de 4 minuts en la màquina (*Figura 39*).



Llavors, s'ha utilitzat un marcador de metall dur (Co-WC) (*Figura 40*) per afegir-hi a les nostres mostres la nomenclatura utilitzada fins ara per a identificar totes les condicions de brunyit que la mostra porta. Aquest cop, s'ha afegit al final una nova condició de brunyit a la nomenclatura que indicarà si aquesta s'ha produït amb una o cinc passades: R/L10/20/40_AV/SV_L/P_1/5 (*Figura 41*).



Figura 40. Marcador amb punta de metall dur.

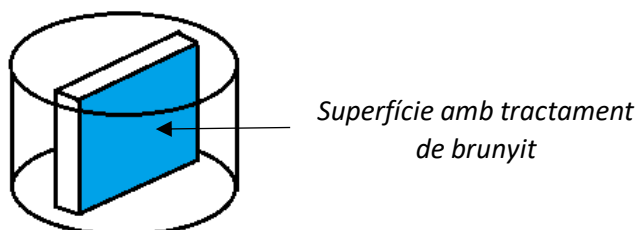


Figura 41. Esquema sobre com s'han encastat les mostres.

Els últims passos per preparar les mostres són el de desbast i polit amb papers de desbast que contenen partícules de diferent mida. Primer s'ha utilitzat la polidora Buehler (*Figura 42.a*), on s'ha emprat els següents cinc papers: P80, P320, P600, P1200 i P2500. En el procés de polir les mostres, s'ha canviat la direcció de polir 90° cada cop que es canviava el paper. Un cop finalitzat cada procés de polit en un mateix paper, s'ha netejat cada mostra abans de polir amb el paper menor mida de partícules següent.

Un cop polides totes les mostres, s'ha utilitzat una segona polidora manual de plats magnètics Struers (*Figura 42.b*) on s'ha emprat dos papers de desbast amb una mida de partícules de 6µm i 3µm tot seguint el mateix procediment de polit esmentat anteriorment en l'altre polidora.

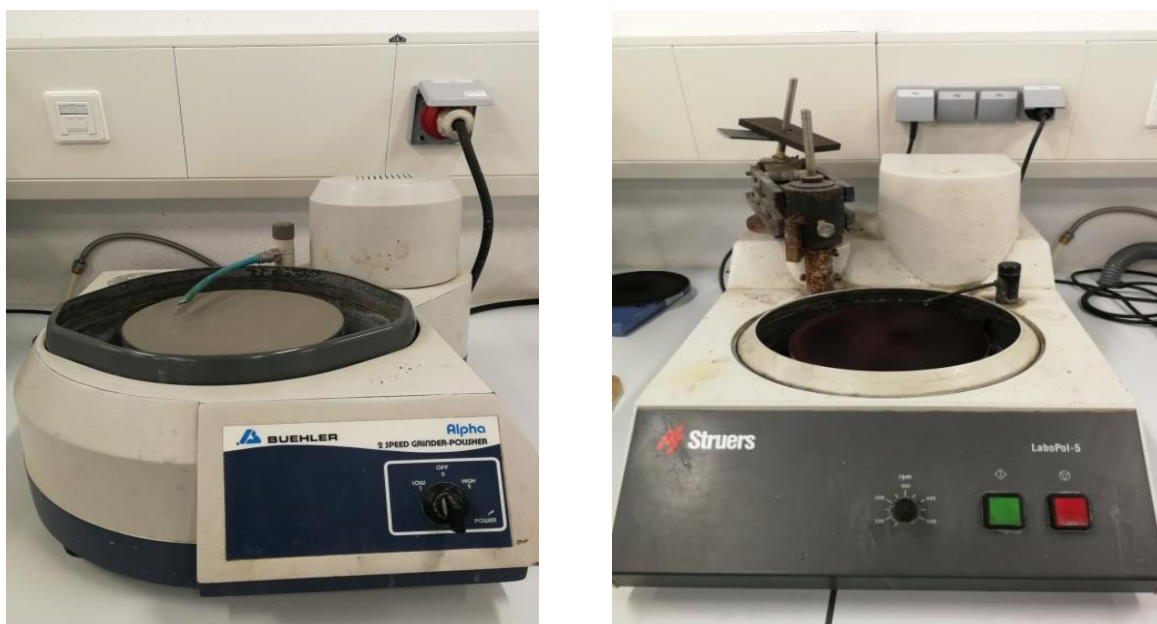


Figura 42. Fotografies de les polidores: a) Buehler; b) Buehler.



Figura 43. Fotografia d'una les mostres encastada, marcada i polida.

2.5. Caracterització de la superfície

2.5.1. Rugositat

L'acabat superficial dels cossos geomètrics pot presentar errors de forma Macrogeomètriques i errors de forma Microgeomètriques, sent aquests últims els que té que s'estudien quan parlem de rugositat superficial.

La rugositat es defineix com totes aquelles irregularitats que formen el relleu de la superfície real i que convencionalment es defineixen dins d'una zona en la qual es eliminen les desviacions o errors de forma i les ondulacions (27). Els mètodes més habituals de mesura de la rugositat superficial són el rugosímetre o el perfilòmetre que es basen en el registre dels perfils d'altures de la superfície.

El sistema de microtopografia i perfilometria emprat per aquest estudi és el model Micromesure 2 de Stil (Figura 44) que disposa d'uns desplaçaments de 100 x 100 mm (X, Y) i Z de 50 mm. Permet realitzar mesures, de forma i textura superficial sense estar en contacte amb aquesta a través de la tecnologia confocal. Els sensors òptics disponibles tenen rangs des de 20 μm fins a 10 mm amb resolucions de 2 nm a 0,3 μm .



Figura 44. Fotografia del perfilòmetre Micromesure 2 de Stil.

És una tècnica de no contacte per a la caracterització de perfils en dos dimensions i superfícies en tres dimensions. Els objectius interferomètrics disposen d'un divisor de feix que envia una part de la llum a la superfície de la mostra i una altra part a un mirall de referència. La llum reflectida d'aquestes dues superfícies es recombina formant bandes d'interferència que es recullen en una càmera CCD. Per a cada punt de la superfície hi ha una distància de l'objectiu a la mostra que proporciona l'enfocament (definit per la intensitat màxima de pic en les bandes d'interferència). Mitjançant un escombrat vertical es localitzen els punts d'enfocament per a cada punt de la mostra, generant així un mapa tridimensional de la superfície, amb resolució sub-nanomètrica en l'eix vertical.

Amb aquesta tècnica s'obtenen millors resultats que amb les basades en làser per mesurar amb extrema precisió en qualsevol superfície (especular, mat, transparent, etc.). S'utilitza en mesuraments en peces metàl·liques, cristall, materials sintètics etc.

Al llarg d'aquest projecte, s'ha utilitzat el perfilòmetre en dos casos diferents. El primer cop que s'ha emprat aquesta eina per a conèixer la rugositat superficial de l'acer ha sigut per a la selecció de les variables per al procés de brunyit, definit anteriorment en l'apartat 2.3.

El segon cop que s'ha fet ús del perfilòmetre ha sigut per a conèixer l'estat de la superfície en tres dimensions de les petjades de 10x10mm realitzades amb les condicions de sense vibració (SV), direcció del brunyit perpendicular al laminat (P) amb una i cinc passades (1P/5P). L'elecció d'aquestes condicions de brunyit a estudiar ve donada per l'interès d'observar com varia la rugositat superficial en funció del nombre de passades de brunyit, ja que com hem observat anteriorment en l'apartat 2.3.2. no s'observa cap diferència significativa en aplicar vibració al brunyit o la direcció en que s'ha realitzat d'aquest.

La metodologia seguida per a mesurar la rugositat superficial de les mostres en el segon cas és la següent:

1. Encendre el perfilòmetre i, posteriorment, l'ordinador.
2. Un cop carregat el sistema, s'executa el programa Surface Map el qual registrarà les dades obtingudes pel perfilòmetre.
3. Col·locar la mostra damunt del porta mostres de manera que la llum verda emesa per la punta del perfilòmetre quedi just damunt del punt de partida que volem analitzar de la mostra.
4. Introduir els valors dels paràmetres del sensor general (Altitud, Intensitat etc.).
5. Introduir els valors dels paràmetres dels eixos (Distància, pas, direcció de l'eix etc.).
6. Realitzar un anivellament de la superfície del porta mostres per a que quedi la superfície de la mostra a estudiar el més horitzontal possible.
7. Realitzar la mesura de la superfície tant en 2 dimensions com en 3 dimensions.
8. Guardar els resultats d'altitud i intensitat en els formats d'arxiu adequats per a analitzar-los posteriorment amb el programa de tractament de dades SPIP.

2.5.2. Microscopi òptic confocal

El microscopi confocal que és un instrument que permet realitzar talls òptics fins a mostres de teixits més o menys gruixuts i realitzar reconstruccions en tres dimensions a partir de talls seriat. El seu principal avantatge és que permet obtenir imatges de major qualitat mitjançant tècniques de filtrat espacial que eliminen la llum que prové de plànols que no estan enfocats. Això permet controlar la profunditat de camp i, a més, obtenir sèries d'imatges de l'espècimen canviant el pla enfocat (28).

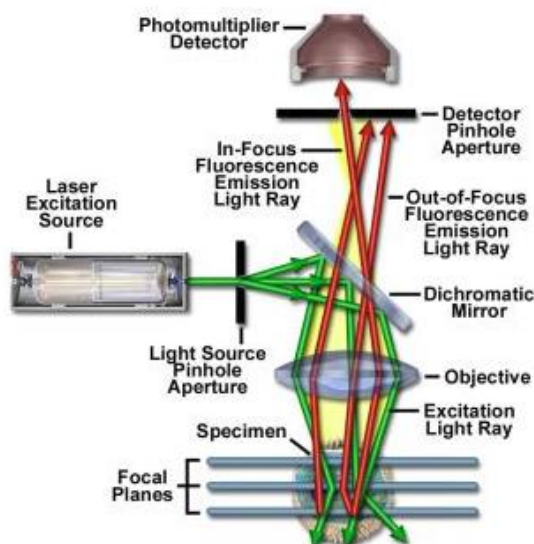


Figura 45. Esquema del funcionament d'un microscopi òptic confocal.

Per formar la imatge en pla Z el làser escaneja la superfície del preparat en el pla X-Y, després es selecciona un altre pla per escanejar novament, obtenint així una sèrie de talls de la mostra. L'obtenció de seccions òptiques més o menys gruixudes està determinada per una combinació entre el diàmetre del diafragma de detecció, l'obertura numèrica de l'objectiu i la longitud d'ona de la llum utilitzada (28). El microscopi òptic confocal que s'ha emprat en aquest projecte ha estat l'Olympus Lext (Figura 46).



Figura 46. Fotografia del microscopi òptic confocal.

2.5.3. Microscopi electrònic de rastreig (SEM)

Un microscopi electrònic de rastreig (SEM) és un tipus de microscopi electrònic que produeix imatges d'una mostra escanejant la superfície amb un feix d'electrons centrat. Els electrons interactuen amb els àtoms de la mostra, produint diversos senyals que contenen informació sobre la topografia i la composició de la superfície de la mostra. El feix d'electrons s'escaneja en un patró d'escàner i la posició del feix es combina amb el senyal detectat per produir una imatge (Figura 47). SEM pot aconseguir una resolució millor que 1 nanòmetre (29).

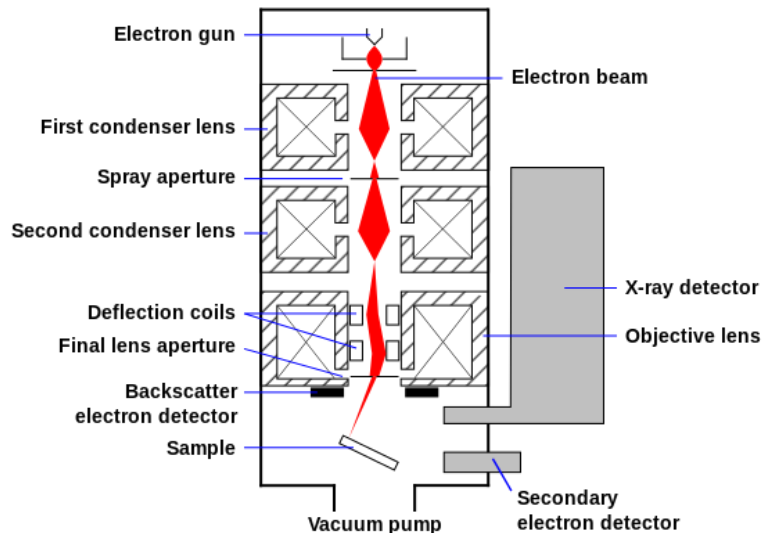


Figura 47. Esquema de funcionament del microscopi electrònic de rastreig (SEM) (29).

El mode SEM més comú és la detecció d'electrons secundaris emesos per àtoms excitats per el raig d'electrons. El nombre d'electrons secundaris que es poden detectar depèn, entre altres coses, en la topografia d'exemplars. En escanejar la mostra i recollir els electrons secundaris que s'emeten utilitzant un detector especial, es crea una imatge que mostra la topografia de la superfície. El microscopi electrònic utilitzat en aquest projecte ha estat el Phenom XL, de la marca Phenomworld (Figura 48).

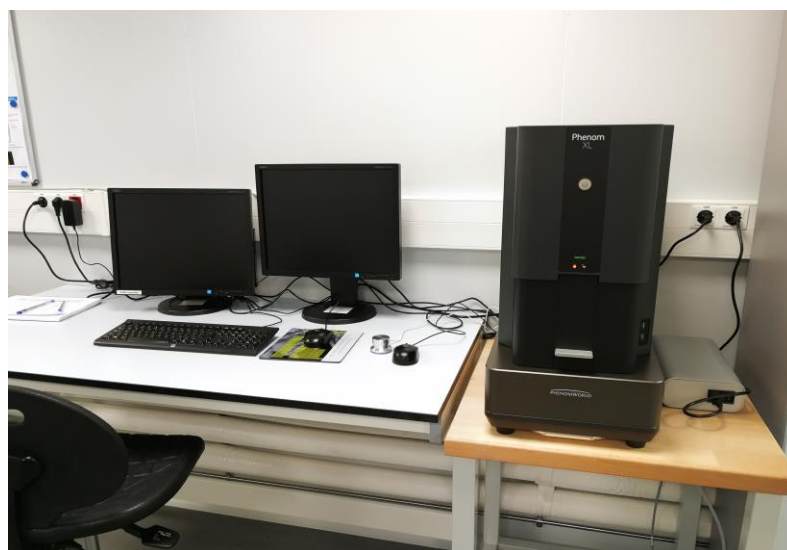


Figura 48. Fotografia del microscopi electrònic de rastreig (SEM).

2.5.4. Interferòmetre òptic làser

L'interferòmetre òptic és un instrument òptic que empra la interferència de les ones de llum per mesurar amb gran precisió longituds d'ona de la mateixa llum per a la realització de mesures topogràfiques en tres dimensions, sense contacte, amb resolució nanomètrica.

Hi ha molts tipus de interferòmetres, en tots ells s'utilitzen dos feixos de llum que recorren dues trajectòries òptiques diferents, determinades per un sistema generalment de miralls i prismes que, finalment, convergeixen per formar un patró d'interferència (*Figura 49*) (30).

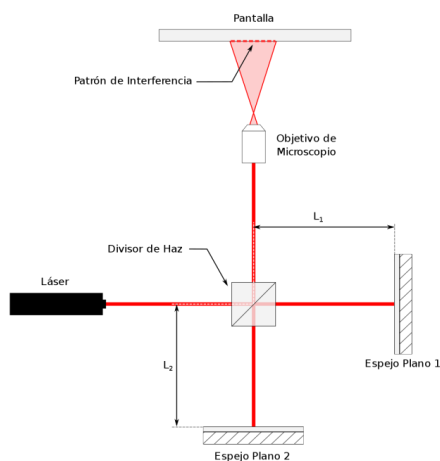


Figura 49. Esquema de funcionament de l'interferòmetre (30).

Per mesurar la longitud d'ona d'un raig de llum monocromàtica s'utilitza un interferòmetre disposat de tal manera que un mirall situat a la trajectòria d'un dels feixos de llum pot desplaçar-se una distància petita, que pot mesurar-se amb precisió, de manera que és possible modificar la trajectòria òptica del feix. Quan es desplaça el mirall una distància igual a la meitat de la longitud d'ona de la llum, es produeix un cicle complet de canvis en les franges d'interferència. La longitud d'ona es calcula mesurant el nombre de cicles que tenen lloc quan es mou el mirall una distància determinada. L'interferòmetre emprat en aquest projecte ha estat el Wyko NT 9300, de la marca Veeco. (*Figura 50*).



Figura 50. Fotografia de l'interferòmetre òptic làser.

La mitjana del camp de visió d'aquest equip es de 8.45mm ($10.8\text{mm} \times 8.1\text{mm}$). La resolució del equip en el eix vertical es inferior a 0.01nm i el rang de mesura vertical es de 0.1nm fins a 10mm .

2.6. Caracterització mecànica

2.6.1. Microduresa

El microduròmetre és un instrument que mesura la resistència a la penetració d'una eina de determinada geometria. L'assaig de duresa és simple i d'alt rendiment i és particularment útil per avaluar propietats dels diferents components microestructurals del material (26).

Els mètodes existents per a la mesura de la duresa es distingeixen bàsicament per la forma de l'eina emprada (penetrador), per les condicions d'aplicació de la càrrega i per la pròpia forma de calcular (definir) la duresa. L'elecció del mètode de determinació de la duresa depèn de factors com ara tipus, dimensions de la mostra i gruix de la mateixa. En particular, el tipus d'assaig mecànic que realitzarem serà el tipus Vickers. Aquest mètode és molt difós ja que permet mesurar duresa en pràcticament tots els materials metàl·lics independentment de l'estat en què es trobin i del seu gruix (26).

El procediment Vickers empra un penetrador de diamant en forma de piràmide de base quadrada. Aquest penetrador és aplicat perpendicularment a la superfície que conté la duresa que es desitja mesurar, sota l'acció d'una càrrega P . Aquesta càrrega és mantinguda durant un cert temps, després del qual és retirada i posteriorment, es mesura la diagonal d de la impressió que va quedar sobre la superfície de la mostra (veure figura). Amb aquest valor i utilitzant taules apropiades es pot obtenir la duresa Vickers, que és caracteritzada per HV i definida com la relació entre la càrrega aplicada (expressada en kgf) i l'àrea de la superfície lateral de la impressió.

El microduròmetre existent en el laboratori, un microduròmetre Buehler (*Figura 51*), utilitza un marcador piramidal de diamant amb un angle de 136° entre les cares oposades. Com a resultat de la forma del marcador, la impressió sobre la mostra (l'empremta) serà un rombe rectangular. La longitud de la diagonal del rombe es mesura a través del microscopi que conté el microduròmetre.



Figura 51. Fotografia del microduròmetre emprat per a les indentacions.

Abans de mesurar les mostres però, s'ha tingut que calibrar el microduròmetre per tal d'obtenir resultats el més precisos possible. Per a dur a terme el calibrat, s'ha seguit una sèrie de proves sobre un regle nanomètric (*Figura 52*) estipulades per la guia del microduròmetre per a comprovar a diferents objectius (x10, x50 i x100) que la lectura del microduròmetre coincideix amb les mesures del regle.



Figura 52. Fotografia de la peça que conté el regle de prova per a calibrar el microduròmetre.

Un cop finalitzades aquestes proves amb el regle, s'han realitzat unes segones proves mitjançant indentacions sobre una proveta d'acer de 700HV (*Figura 53*). Aquesta segona fase de calibratge consisteix en realitzar diverses indentacions sobre la proveta amb un pes de 100 grams i un temps d'indentació de 10 segons que, al mesurar-les amb diferents objectius, s'obtingui el valor de duresa de 700HV.

Amb això es pretén conèixer l'error de la mesura de duresa del microduròmetre. Per aquest motiu s'han realitzat 10 mesures de la proveta per tal d'obtenir un error de mesura adequat.



Figura 53. Fotografia de la proveta de 700HV per a calibrar el microduròmetre.

Un cop calibrat el microduròmetre, es realitzaran 5 microindentacions a 8 profunditats diferents. Amb això es pretén obtenir 5 mesures de duresa per cada punt de profunditat diferent per tal de conèixer com afecta el brunyit superficial a la duresa d'aquest acer. Els punts establerts per a mesurar la duresa a certa profunditat de la superfície són els següents: a $20\mu m$, $50\mu m$, $80\mu m$, $120\mu m$, $175\mu m$, $250\mu m$, $400\mu m$ i $600\mu m$ de la superfície.

La metodologia que s'ha seguit per a la mesura de la duresa de les mostres ha estat la següent:

1. Encendre el microduròmetre.
2. Encendre l'ordinador i obrir les plantilles d'Excel on es calcularà la mitjana de les dureses mesurades posteriorment.
3. Col·locar l'objectiu de x50 augments i una força de 50 grams en el microduròmetre.
4. Situar la mostra sobre el porta mostres de manera que la petjada quedi horitzontal al porta mostres. Gràcies al encastrat i polit previ de la mostra, la secció transversal de la petjada hauria de ser perpendicular al penetrador.
5. Baixar suaument l'objectiu del microduròmetre fins que estigui molt a prop de la superfície de la mostra, vigilant de no tocar-la i anar regulant l'objectiu fins que es vegi una imatge de la superfície ben enfocada.
6. Buscar el límit de la petjada amb l'objectiu desplaçant amb el nònius els eixos X i Y.
7. Situar el penetrador a 20 micres de la superfície, per tal de començar les indentacions a l'interior de la petjada.
8. Realitzar la matriu d'indentacions (8x5) mencionada anteriorment deixant 50µm d'espai entre les 5 indentacions per fila amb l'ajut del nònius.
9. Un cop realitzada la matriu d'indentacions, mesurar les diagonals dels quadrats de les impressions de totes les mostres realitzades.
10. Anotar en una plantilla d'Excel el valor d'aquestes diagonals, el qual a partir d'aquests valors, et calcula la duresa Vickers mitjançant l'equació 5:

$$HV = \frac{1.854 \cdot P}{d^2} \quad (Eq. 5)$$

On:

P = càrrega aplicada (kg)

d= longitud de la diagonal del quadrat de la impressió (mm).

3. Resultats i discussió

3.1. Resultats de la selecció de variables del brunyit

3.1.1. Representació numèrica dels resultats

Per a poder representar gràficament aquests resultats, s'ha calculat la mitjana dels 10 assajos de cada mostra per a disposar d'un únic valor per a cada condició amb la seva desviació estàndard corresponent. Les *Taules 13 i 14* mostren els resultats d'aquests paràmetres en les làmines d'acer L10 i L20:

		<i>Amplitud (mm)</i>	<i>Alçada (μm)</i>
Mitjana L10_AV_TOTES_P	100N	0.35667 ± 0.010	1.56685 ± 0.121
Mitjana L10_SV_TOTES_P		0.37222 ± 0.008	1.93210 ± 0.173
Mitjana L10_AV_TOTES_L		0.35629 ± 0.015	1.81660 ± 0.151
Mitjana L10_SV_TOTES_L		0.36114 ± 0.013	1.56250 ± 0.192
Mitjana L10_AV_TOTES_P	200N	0.47815 ± 0.006	2.92450 ± 0.253
Mitjana L10_SV_TOTES_P		0.46533 ± 0.008	3.42045 ± 0.124
Mitjana L10_AV_TOTES_L		0.46383 ± 0.008	2.74050 ± 0.211
Mitjana L10_SV_TOTES_L		0.44899 ± 0.009	2.64461 ± 0.195
Mitjana L10_AV_TOTES_P	300N	0.60236 ± 0.014	4.90310 ± 0.269
Mitjana L10_SV_TOTES_P		0.57041 ± 0.007	4.93204 ± 0.227
Mitjana L10_AV_TOTES_L		0.55680 ± 0.006	5.23995 ± 0.388
Mitjana L10_SV_TOTES_L		0.53934 ± 0.008	3.95033 ± 0.147
Mitjana L10_AV_TOTES_P	400N	0.64801 ± 0.027	5.68280 ± 0.260
Mitjana L10_SV_TOTES_P		0.63920 ± 0.017	6.24060 ± 0.434
Mitjana L10_AV_TOTES_L		0.63848 ± 0.015	5.98457 ± 1.019
Mitjana L10_SV_TOTES_L		0.64485 ± 0.017	6.05206 ± 0.554
Mitjana L10_AV_TOTES_P	500N	0.71145 ± 0.003	6.73920 ± 0.121
Mitjana L10_SV_TOTES_P		0.75053 ± 0.009	8.09335 ± 0.152
Mitjana L10_AV_TOTES_L		0.67840 ± 0.012	7.44827 ± 0.166
Mitjana L10_SV_TOTES_L		0.69299 ± 0.007	7.73198 ± 0.186

Taula 13. Representació de la mitjana de les mesures de la placa d'acer L10.

		<i>Amplitud (mm)</i>	<i>Alçada (μm)</i>
Mitjana L20_AV_TOTES_P	100N	0.33483 ± 0.021	1.13909 ± 0.219
Mitjana L20_SV_TOTES_P		0.36350 ± 0.030	1.99490 ± 0.283
Mitjana L20_AV_TOTES_L		0.40530 ± 0.011	1.37350 ± 0.283
Mitjana L20_SV_TOTES_L		0.41681 ± 0.009	1.80394 ± 0.208
Mitjana L20_AV_TOTES_P	200N	0.40183 ± 0.044	2.39199 ± 0.367
Mitjana L20_SV_TOTES_P		0.46253 ± 0.013	2.40895 ± 0.367
Mitjana L20_AV_TOTES_L		0.42369 ± 0.013	2.33650 ± 0.367
Mitjana L20_SV_TOTES_L		0.45663 ± 0.012	2.35889 ± 0.304
Mitjana L20_AV_TOTES_P	300N	0.49652 ± 0.011	4.00358 ± 0.716
Mitjana L20_SV_TOTES_P		0.52160 ± 0.010	3.74343 ± 0.435
Mitjana L20_AV_TOTES_L		0.50010 ± 0.010	2.21330 ± 0.435
Mitjana L20_SV_TOTES_L		0.53570 ± 0.005	2.48183 ± 0.071
Mitjana L20_AV_TOTES_P	400N	0.57556 ± 0.022	4.30518 ± 0.754
Mitjana L20_SV_TOTES_P		0.53042 ± 0.013	4.31808 ± 0.406
Mitjana L20_AV_TOTES_L		0.52914 ± 0.013	2.71635 ± 0.406
Mitjana L20_SV_TOTES_L		0.53676 ± 0.023	2.52101 ± 0.025
Mitjana L20_AV_TOTES_P	500N	0.67646 ± 0.010	6.24257 ± 0.406
Mitjana L20_SV_TOTES_P		0.59530 ± 0.010	5.49483 ± 0.274
Mitjana L20_AV_TOTES_L		0.55880 ± 0.010	3.63000 ± 0.274
Mitjana L20_SV_TOTES_L		0.57448 ± 0.005	2.82247 ± 0.160

Taula 14. Representació de la mitjana de les mesures de la placa d'acer L20.

3.1.2. Representació gràfica amb MiniTab

Introduint numèricament en el programa les taules anteriors per a cada làmina d'acer (R, L10, L20 i L40) obtenim gràficament les interaccions de cada condició de brunyit entre elles respecte l'alçada de les petjades (*Figura 54*).

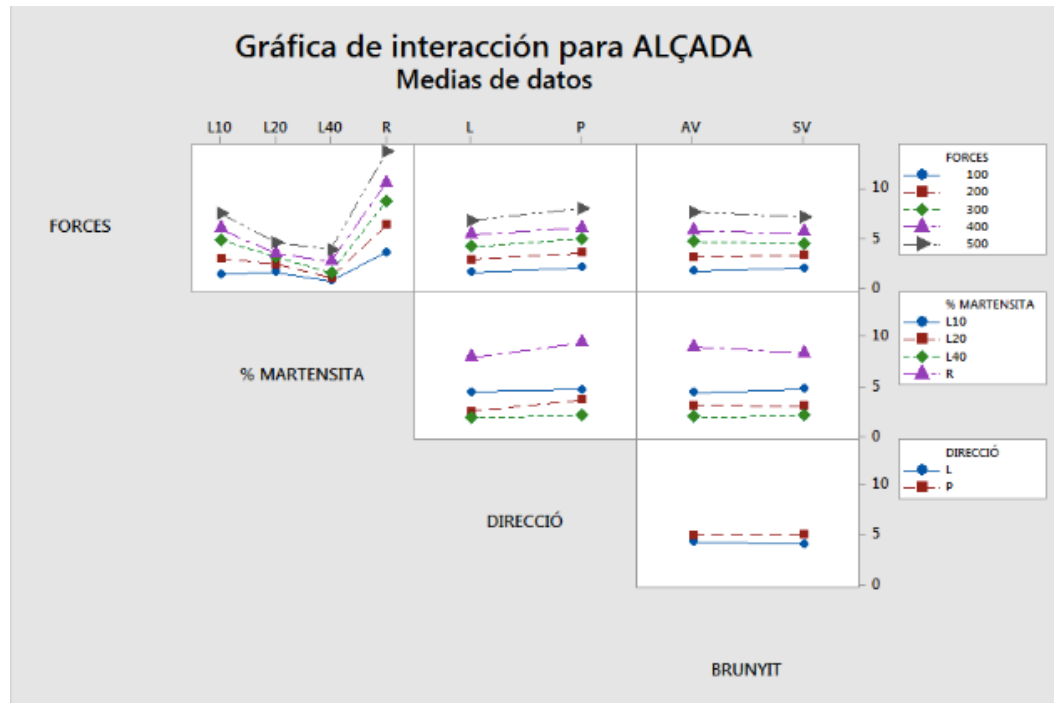


Figura 54. Gràfica d'interacció de les diferents condicions de brunyit per la alçada .

Un cop obtinguda la representació gràfica de totes les interaccions de cada condició de brunyit, s'ha realitzat una altra representació gràfica que mostra de manera clara la influència de cada condició de brunyit per separat respecte l'alçada de les petjades (*Figura 55*).

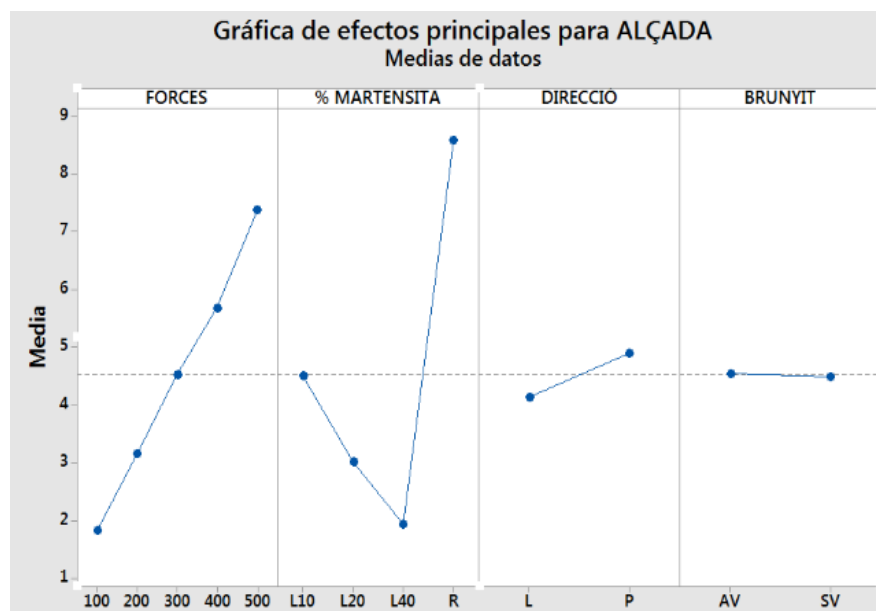


Figura 55. Representació gràfica de la influència de cada condició de brunyit respecte l'alçada de les petjades (31).

3.1.3. Observacions sobre el comportament de l'acer

Un cop comparats els resultats de les 4 làmines en les respectives condicions de recuit i laminat, podem observar com són les interaccions de les diferents condicions de brunyit aplicades durant el procés de caracterització:

- Al aplicar la vibració sobre l'eina de brunyir, podem observar que no te pràcticament cap efecte sobre les mostres, tant aplicant la tècnica de brunyir amb o sense vibració, els resultats són pràcticament els mateixos.
- Podem observar una relació lineal en les forces, quant més alt és el valor de la força del brunyit, més grans són les petjades mesurades.
- Pel que fa al contingut de martensita, no es tracta d'una relació lineal, sinó més bé d'una relació logarítmica. A mesura que s'incrementa el contingut de martensita, s'assoleixen increments de duresa superficial més baixos.
- Podem veure que existeix una lleugera influència en la realització de les passades en direcció laminar o perpendicular al laminat, ja que en la direcció perpendicular s'obtenen uns valors a la petjada una mica més elevats que a la direcció laminar.

3.2. Anàlisis de la superfície de les petjades

3.2.1. Resultats obtinguts amb el Microscopi òptic Confocal

Amb el microscopi òptic Confocal hem obtingut imatges normals i imatges a través de la tecnologia confocal de la superfície de les petjades per a totes les condicions esmentades en l'apartat 2.5.1. utilitzant augments de x10, x20 i x50.

S'ha comparat la superfície de la petjada de la làmina amb un 10% de fase inicial de martensita (L10) amb la petjada de la làmina composta per un 20% de fase inicial de martensita (L20) ambdues realitzades amb cinc passades de brunyit amb bola. Amb això es pretén observar com afecta aquesta diferència de 10% en el contingut de martensita inicial quan se'ls hi aplica la tècnica de brunyit amb bola sobre la superfície de les làmines en funció de la duresa que aquestes presenten.

Tant en la làmina amb 10% de fase martensítica inicial com la làmina de 20% de fase martensítica inicial realitzades amb cinc passades (*Figura 56*) es pot veure clarament la direcció en la que s'ha realitzat el brunyit amb bola i ens deixen una imatge de la superfície prou semblant entre les dos.

Cal destacar també però, que tot i que la làmina L20 original presenta una superfície una mica més plana i més ben definida, la làmina L10 original ha sofert una evolució més considerable respecte l'estat de la làmina original. Això ens mostra la influència de la duresa respecte al brunyit en termes visuals, quanta menys duresa presenta una superfície, més modificada es veurà, deixant ambdues amb una superfície molt semblant a la de la làmina amb un 40% de contingut de martensita un cop aplicada la tècnica de brunyit amb bola.

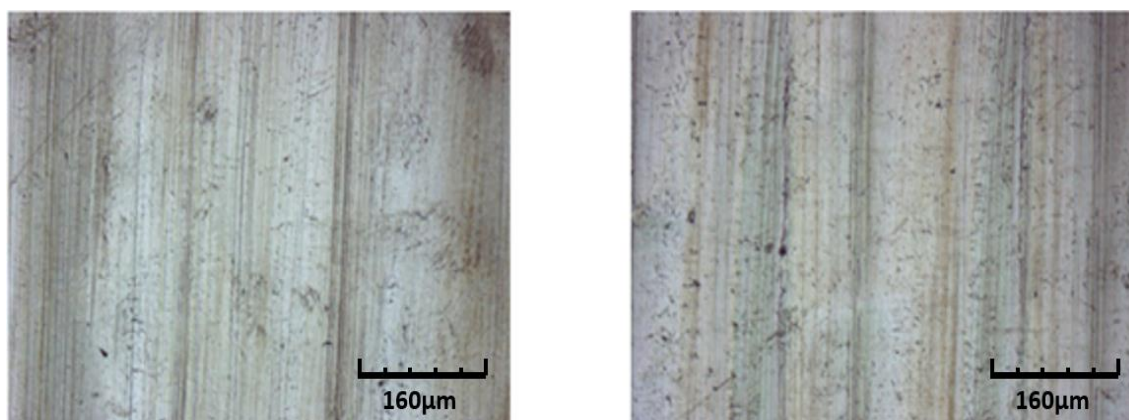


Figura 56. Esquerra: Làmina amb 10% de contingut inicial de martensita; Dreta: Làmina amb 18% de contingut inicial de martensita.

Em utilitzat la tecnologia òptica confocal per tal d'obtenir una fotografia més clara respecte a les valls i els pics de la petjada degut a que les ondulacions superficials de la petjada produïdes per les cinc passades de la bola de brunyir fa que no es pugui obtenir una imatge ben enfocada en tots els seus nivells d'alçada.

Les imatges de la *Figura 57* ens mostren amb un color blanc aquelles zones de la imatge que es situen a menys alçada i en color negre les zones que es situen a més alçada. Aquí es pot apreciar com el fet de que la làmina que té un 10% de contingut de martensita tingui menys duresa i que per tant, es veu més afectada pel brunyit, deixa com a resultat una superfície amb més daltabaixos. Per contra, en la làmina que presenta un 18% de contingut de martensita es pot apreciar amb més claredat els pics i les valls produïdes per la bola de brunyir.

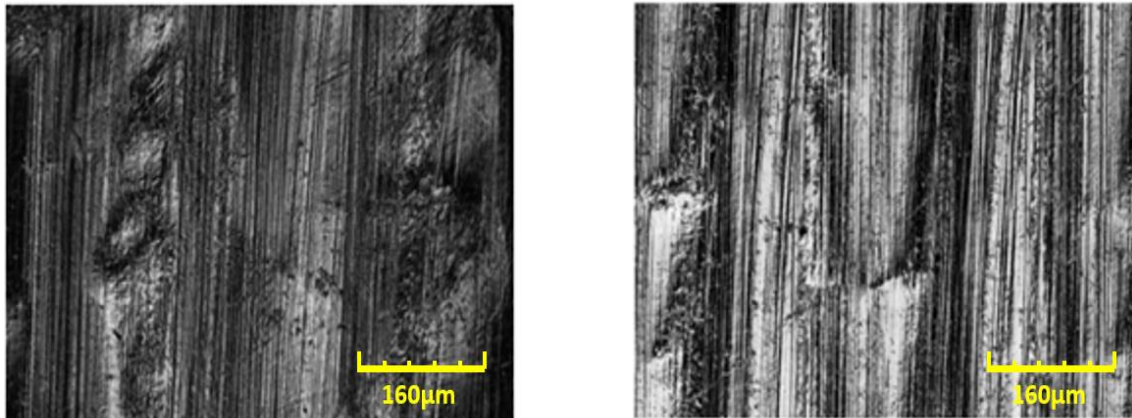


Figura 57. Esquerra: Làmina amb 10% de contingut inicial de martensita; Dreta: Làmina amb 20% de contingut inicial de martensita.

La resta de fotografies preses a les mostres de la làmina en condició de recuit i amb un 40% de fase martensítica inicial que falten es poden trobar a l'Annex A.1.

3.2.2. Resultats obtinguts amb el Rugosímetre 3D

Per a conèixer la rugositat superficial de les petjades produïdes per la tècnica de brunyit amb bola, l'eina principal emprada ha sigut el rugosímetre 3D mencionat a l'apartat 2.5.1. amb les condicions de brunyit esmentades en aquest afegint una nova condició (O) per a la làmina original, abans d'aplicar la tècnica del brunyit. Amb això, s'ha recreat una imatge 3D de 6x6cm de la superfície brunyida de cada mostra.

Si comparem la superfície 3D recreada de la làmina amb 10% de contingut de martensita (*Figura 58*) amb la làmina que té un 18% de contingut de martensita (*Figura 59*) podem observar com després de realitzar les cinc passades de brunyit, la làmina L10 presenta una superfície més irregular, amb pics i valls més notables que la làmina L20.

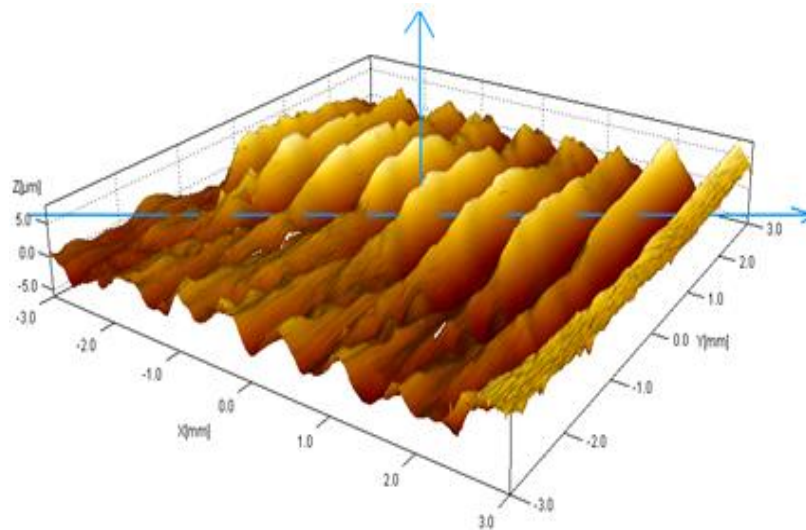


Figura 58. L10_SV_P_5P.

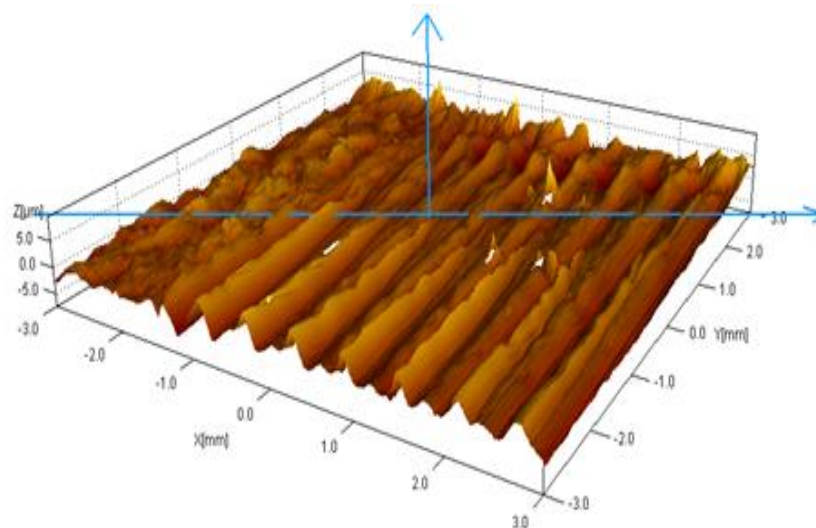


Figura 59. L20_SV_P_5P.

Mentre que la làmina amb un 18% de contingut de martensita presenta una rugositat superficial semblant a la làmina amb un 38% de contingut de martensita, la làmina amb un 10% de fase martensítica inicial presenta una rugositat que es situa entre la rugositat superficial que presenta la làmina en condició de recuit i la làmina amb el 20% de fase martensítica inicial. En tot cas, es torna a posar de manifest el fet de que quanta més duresa original presenta la làmina, més petita es la marca superficial produïda pel brunyit.

Per a obtenir un estudi exhaustiu sobre les característiques superficials que presenta cada mostra, s'han registrat els valors de rugositat superficial que presenta cada petjada (*Taula 15*) mitjançant les següents dades estadístiques:

Làmina	S_a (nm)	S_q (nm)	S_v (nm)	S_p (nm)	Std (°)	S_{sk}	S_{ku}
R_O	349.04	464.35	5048.8	12396	90.056	0.46153	19.649
R_SV_P_1	2938.8	3645.2	15335	19131	89.586	0.48685	3.0273
R_SV_P_5	2201.4	2769.8	9387.9	39446	89.84	0.61242	6.0274
L10_O	145.59	224.34	5095.2	6906.3	89.266	-1.0347	58.424
L10_SV_P_1	1615.4	1964.7	16412	6299	87.503	0.41062	2.5832
L10_SV_P_5	1912.2	2375.4	5965	7661.7	87.192	0.51026	2.8726
L20_O	146.92	190.6	2605.5	3349.6	86.914	0.26291	8.1816
L20_SV_P_1	738.89	912.35	4713.8	3557.2	77.316	-0.30387	2.8545
L20_SV_P_5	1022.3	1326.3	7424.8	9539.8	88.401	0.12035	3.8992
L40_O	76.4	107.85	1096.6	2730.7	88.256	1.9367	34.863
L40_SV_P_1	906.07	1071	3158.2	3527.8	98.289	-0.036508	2.1705
L40_SV_P_5	1557	1876.2	4634.9	7992.2	89.867	0.36635	2.3239

Taula 15. Taula numèrica i estadística dels resultats superficials de les mostres del rugosímetre (31).

On:

- S_a (*Arithmetical mean height*): Expressa, com a valor absolut, la diferència d'alçada de cada punt en comparació amb la mitjana aritmètica de la superfície.
- S_q (*Root mean square height*): Representa el valor del quadrat mitjà de l'arrel dels valors ordenats dins de l'àrea de definició. És equivalent a la desviació estàndard de les altures.
- S_v (*Maximum pit height*): És el valor absolut de la profunditat de la vall més gran dins de l'àrea definida.
- S_p (*Maximum peak height*): És l'alçada del pic més alt dins de l'àrea definida.
- S_{td} (*Texture direction*): Representa la direcció de la textura de la superfície.
- S_{sk} (*Skewness*): Els valors representen el grau de biaix de la forma de rugositat (aspror).
- S_{ku} (*Kurtosis*): És una mesura de la brusquedat del perfil rugós.
 - $S_{ku} < 3$: la distribució d'alçada es distingeix una mica per sobre del pla mitjà.
 - $S_{ku} = 3$: la distribució d'alçada és normal. (Coexisteixen porcions agudes i porcions indentades).
 - $S_{ku} > 3$: la distribució de l'alçada és punxeguda.

Per a la elaboració de la *Taula 13* s'han recreat les superfícies en 3D de totes les mostres que falten per mostrar. Es poden veure en l'*Annex A.2.1*.

Amb els resultats mostrats en aquesta taula com els valors de rugositat superficial es pot observar com el fet d'aplicar el brunyit amb cinc passades, sembla deixar una superfície més rugosa que amb una sola passada tret del cas de la làmina amb condició de recuit. Això es pot deure al fet de que al ser la làmina en condició de recuit tant tova en comparació a les que tenen contingut de martensita, les pròpies marques de la bola de brunyir de la segona, tercera, quarta i cinquena passada aplanen les ondulacions produïdes en la primera passada. Cosa que no succeeix en les làmines que presenten fase martensítica ja que la primera passada no te la capacitat de deixar tanta marca com amb cinc passades.

Un cop analitzada la rugositat superficial de les mostres amb el Rugosímetre 3D, s'ha emprat una segona eina per a mesurar la rugositat superficial per tal de verificar els resultats obtinguts anteriorment. Si amb el rugosímetre hem obtingut resultats de la rugositat superficial, amb l'interferòmetre hem obtingut els perfils de rugositat de les mostres. La *Figura 60* i la *Figura 61* mostren els perfils de rugositat de les mostres realitzades sense vibració en direcció perpendicular al laminat on es poden trobar valors de rugositat semblants als obtinguts amb el rugosímetre. Cal afegir que, al tractar-se de l'anàlisi del perfil de la petjada, sempre s'obindran resultats menys qualitatius que els obtinguts en l'anàlisi d'una superfície. Per tant, trobem bastant més fiables les rugositats superficials obtingudes amb el rugosímetre 3D.

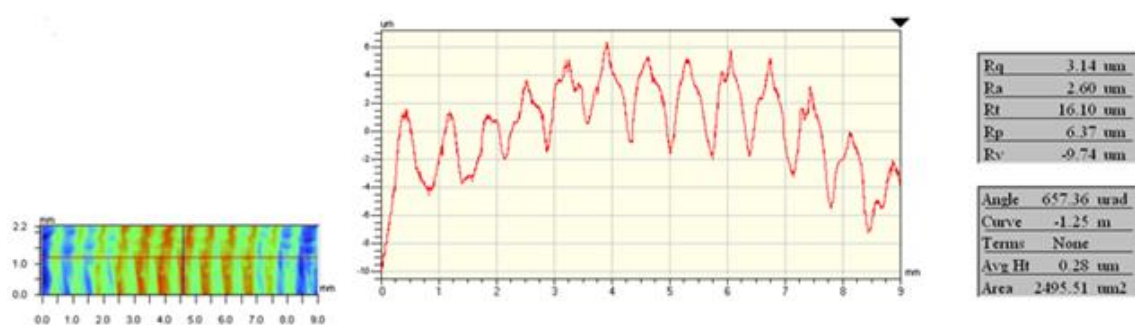


Figura 60. Perfil de rugositat superficial de la mostra L10 per a les condicions de sense vibració, brunyit perpendicular a la direcció de laminació i cinc passades.

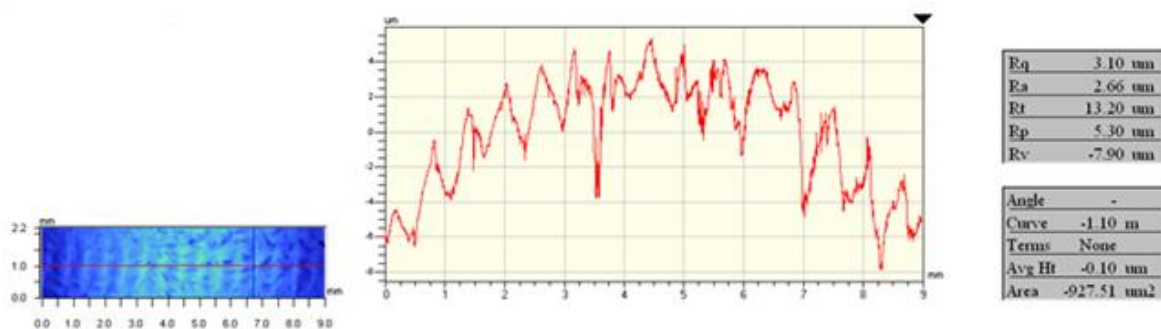


Figura 61. Perfil de rugositat superficial de la mostra L20 per a les condicions de sense vibració, brunyit perpendicular a la direcció de laminació i cinc passades..

3.2.3. Resultats obtinguts amb el microscopi electrònic de rastreig

Mitjançant el microscopi òptic confocal hem obtingut imatges superficials on no s'han observat grans diferències com hem vist a l'apartat 3.2.1. Per aquest motiu s'ha decidit utilitzar el microscopi electrònic de rastreig (SEM) per tal d'obtenir imatges més focalitzades a les valls de les mostres per a observar amb més detall l'estat de la superfície per on ha passat la bola de brunyir.

En aquest cas, s'ha decidit estudiar primer la superfície resultant produïda sense vibració i el brunyit en direcció perpendicular al laminat, ja que és la condició més crítica, per una i cinc passades en la làmina de recuit (R) degut a que aquesta és la més tova i s'observarà amb més claredat les marques superficials.

En la *Figura 62* es pot observar com, tot i presentar unes imatges de les seves valls bastant semblants entre si, la mostra realitzada amb una passada queda menys polida, amb apilaments més clars i pronunciats mentre que la mostra realitzada amb cinc passades presenta marques més polides amb apilaments menys diferenciats.

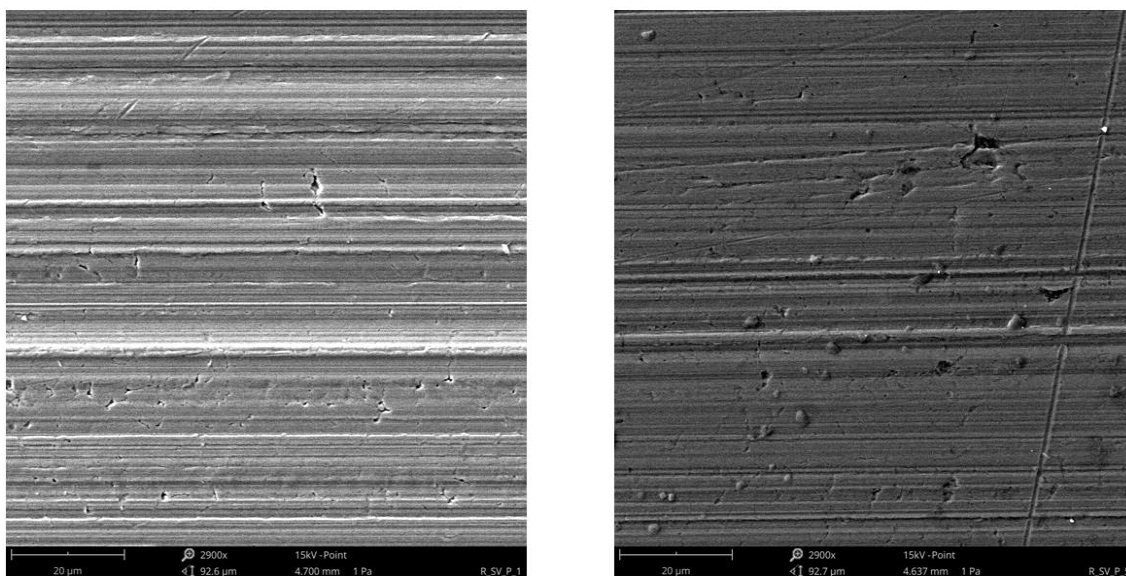


Figura 62. *Esquerra: Superfície de la vall de la làmina en condició de recuit amb una passada; Dreta: Superfície de la vall de la làmina en condició de recuit amb cinc passades.*

Això es deu a que, al realitzar la primera passada, aquesta produeix ondulacions sobre la mostra, presentant uns certs apilaments pels cantons d'on passa la bola de brunyir (pics). Si realitzem la petjada de la mostra amb cinc passades, les passades de la bola de brunyir posteriors a la primera passada van realitzant les noves marques sobre els pics produïts per la passada anterior, fet que fa que acabi resultant una superfície més regular amb pics menys pronunciats. Aquest fenomen només s'observa en el cas de la làmina en estat de recuit. En el cas de les làmines que presenten contingut inicial de martensita, una sola passada no té la capacitat d'ondejar tant la superfície de la mostra com en el cas de la làmina en estat de recuit i, per tant, al realitzar-se més passades el que es produeix és una major ondulació a la superfície.

En segon lloc s'ha comparat la vall de la marca produïda per la bola de brunyir en la làmina en condició de recuit amb cinc passades i la vall resultant de la passada de la bola de brunyir per la làmina amb 38% de contingut inicial de martensita (*Figura 63*). S'ha escollit aquesta comparació degut a que s'obtidrien resultats més evidents en les valls ja que aquestes dos làmines representen els extrems del nostre estudi.

Les fotografies registrades en aquest cas ens deixen unes valls prou semblants al comparar ambdues làmines tot i que la làmina amb un 38% de contingut inicial de martensita no s'observen tantes marques produïdes per la bola de brunyir.

Si ens fixem en els danys superficials de les dues mostres, es pot apreciar com en el cas de la làmina en condició de recuit es veuen estirats en la marca de la bola, mentre que en el cas de la làmina amb un 38% de contingut inicial de martensita no s'aprecien tant aquests danys.

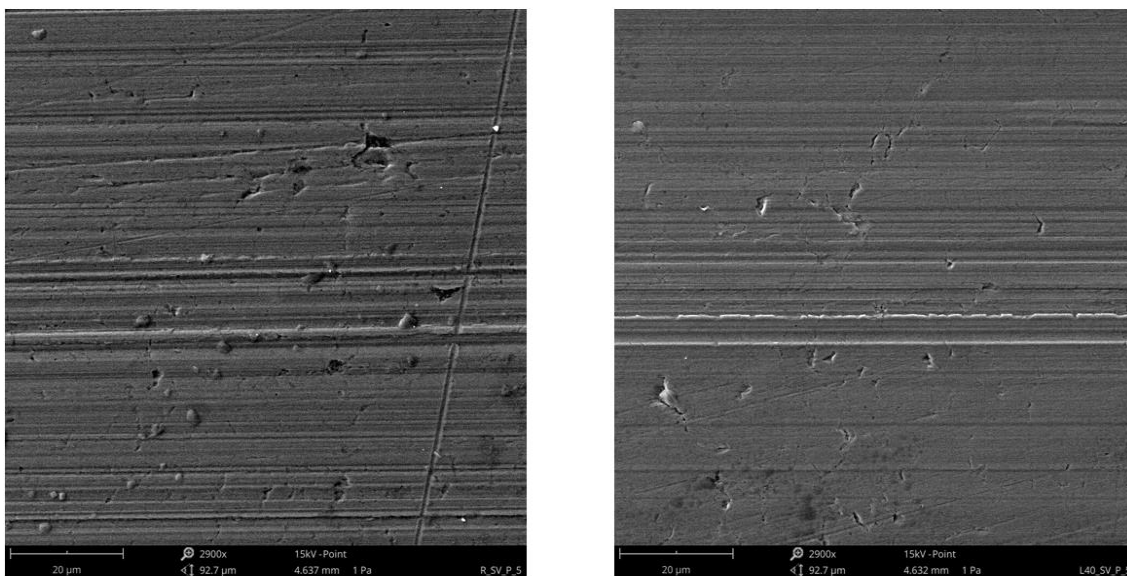


Figura 63. Esquerra: Superfície de la vall de la làmina en condició de recuit amb una passada; Dreta: Superfície de la vall de la làmina en condició de recuit amb cinc passades.

3.3. Anàlisi de la microestructura de les petjades

Per tal d'analitzar l'evolució de la duresa en la superfície de la petjada produïda pel brunyit amb bola, s'han realitzat diversos assajos amb el duròmetre sobre les quatre làmines d'acer (R, L10, L20 i L40) amb les condicions de vibració, direcció de brunyit i únicament cinc passades degut a que com el que ens interessa estudiar es l'evolució de la duresa superficial de la làmina, una passada tindria menys efecte que cinc passades i pertany, ens donaria menys informació. Així doncs, la nomenclatura emprada per a cada és la següent:

$$R/L10/L20/L40_{SV}/AV_L/P_5$$

El procediment seguit per a la realització de la matriu d'indentacions per cada mostra a analitzar és la mencionada en l'apartat 2.6.1. com es pot veure en la *Figura 64*.

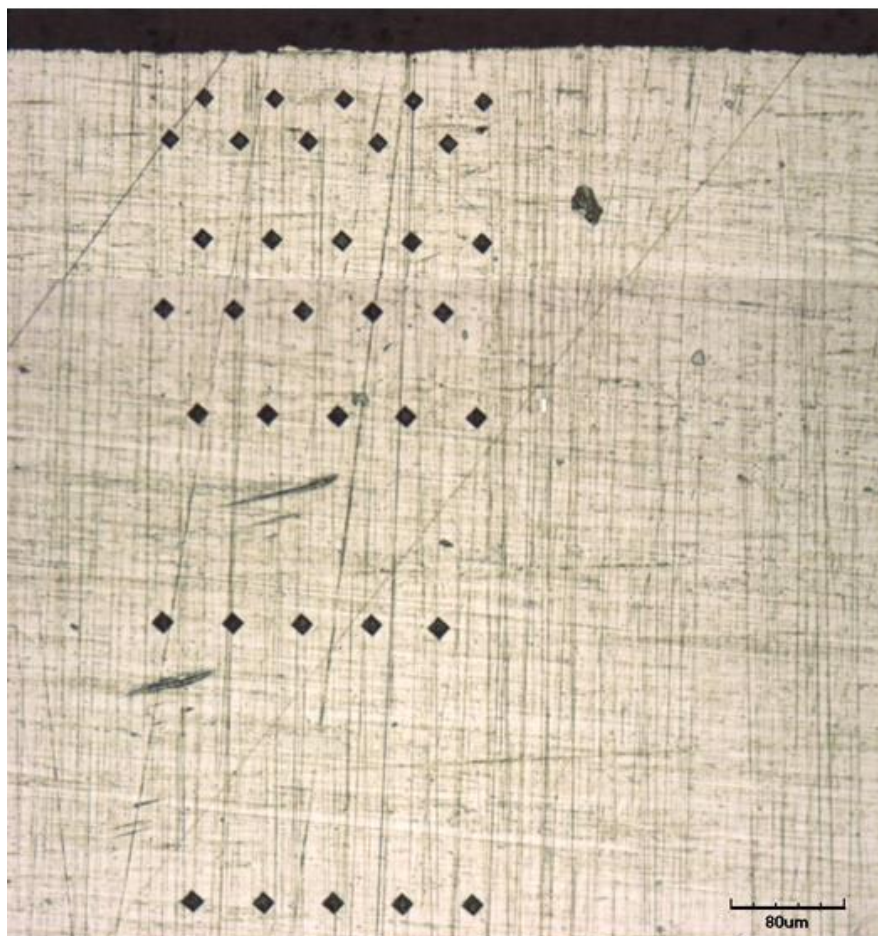


Figura 64. Matriu d'indentacions sobre la làmina amb un 10% de fase inicial martensítica en les condicions de brunyit sense vibració en direcció perpendicular al laminat.

Abans de començar l'anàlisi dels perfils de duresa de les làmines però, cal explicar que la duresa original de cada làmina d'acer inoxidable mencionada en l'apartat 2.1.4 fa referència a la superfície d'aquesta (*Figura 65*). En canvi les indentacions realitzades amb el microduròmetre, s'han fet sobre la secció lateral de la làmina (*Figura 66*). Això comporta que les dureses estudiades en la secció a una certa profunditat sempre seran més altes que les que correspondrien a la mateixa profunditat sobre la superfície.

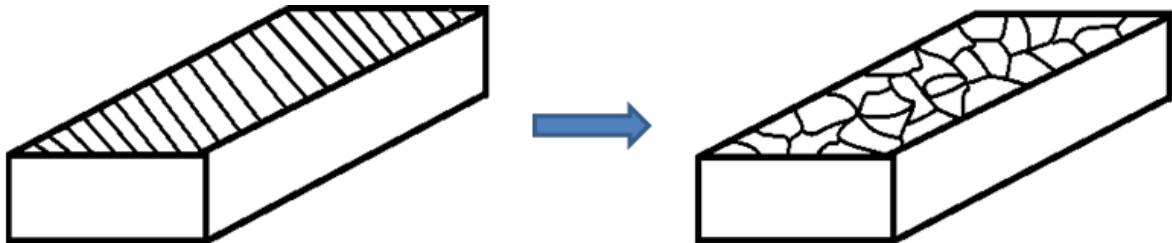


Figura 65. Distribució dels grans en la secció transversal d'un acer.



Figura 66. Distribució dels grans en la secció lateral d'un acer.

3.3.1. Perfil de dureses

En la *Figura 67* es mostra el perfil de dureses de la làmina amb un 10% de fase martensítica inicial obtingut per a cada condició de brunyit esmentada anteriorment. En aquest perfil es pot observar com a mesura que estudiem les indentacions realitzades amb el microduròmetre, a més profunditat, cada cop s'assoleixen dureses més baixes fins al punt d'estabilitzar-se. En aquest cas es pot apreciar com fins als 250µm de profunditat hi ha un increment de duresa considerable de 113.08HV que representa un 34.5% més de la duresa respecte el nucli de la làmina (capa endurida). Es podria considerar que la tècnica del brunyit amb bola ha tingut efecte fins aquest punt degut a que a les dureses estudiades a més profunditat mostren una duresa semblant a la del nucli de la làmina. S'ha considerat que la duresa és la mateixa que la del nucli de la làmina a partir dels 600µm però, com em mencionat anteriorment, aquesta és més alta que la original de la làmina ja que la indentació ha sigut realitzada en la secció lateral de la mostra.

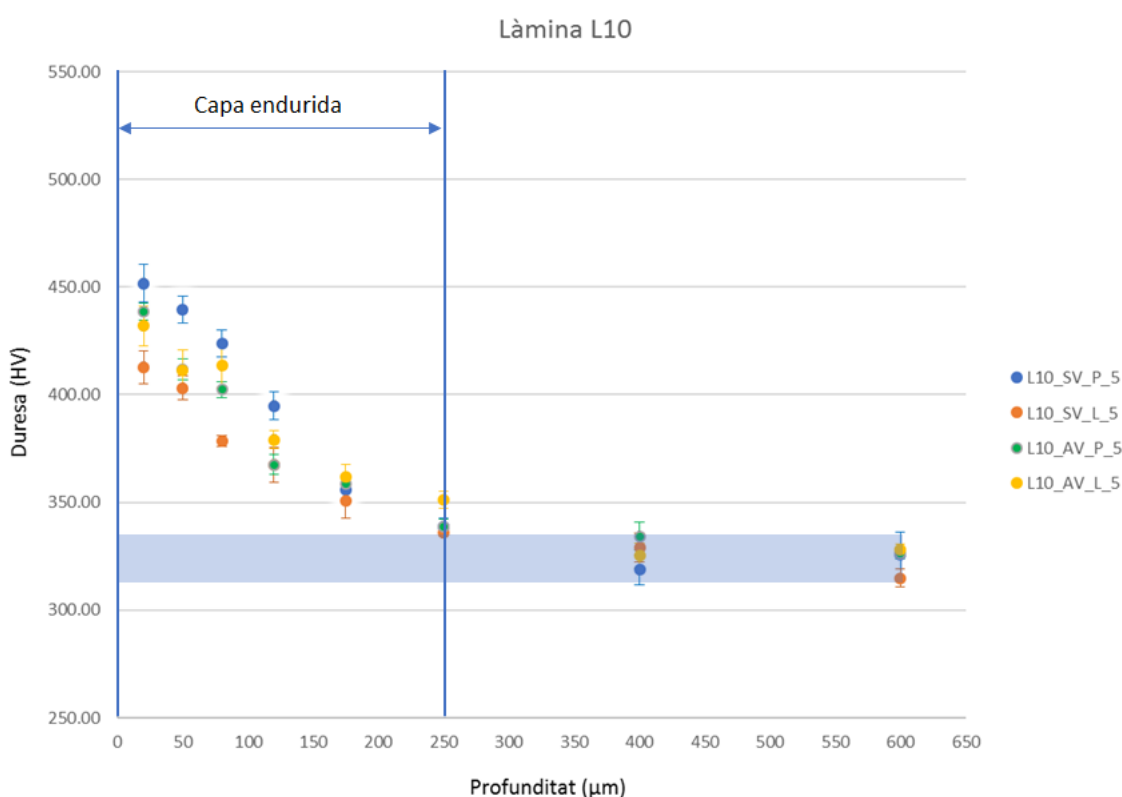


Figura 67. Perfil de dureses de la làmina L10 per a cada condició de brunyit.

Pel que fa a la làmina amb un 18% de fase martensítica inicial (*Figura 68*), es pot observar que te una capa endurida més prima que la làmina amb un 10% de contingut de martensita inicial. En aquest cas la capa endurida arriba fins els 80µm de profunditat i mostra un augment de duresa de 42.95HV, que representa un increment de duresa de 9.5% respecte la duresa del nucli de la làmina.

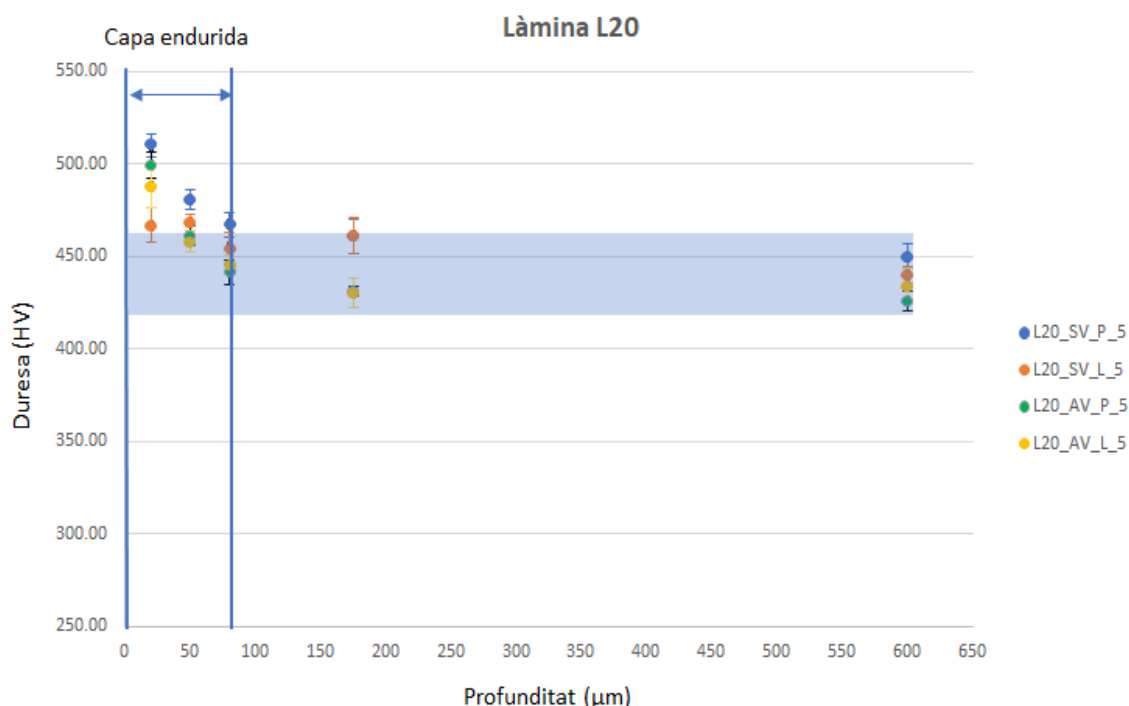


Figura 68. Perfil de dureses de la làmina L10 per a cada condició de brunyit.

En primer lloc es pot observar és que la condició de brunyit amb o sense vibració no te gairebé cap influència sobre la duresa resultant de la làmina mentre que sembla que el realitzar el brunyit perpendicularment a la direcció del laminat aporta un increment una mica més elevat. Això es pot veure amb més detall a les taules de l'Annex A.3.I i A.3.II, on es poden comparar tots els valors de duresa de les làmines incloent la de recuit i amb un 38% de fase inicial martensítica per a cada condició de brunyit. Cal afegir que aquest increment de duresa superficial tant pot ser conseqüència de la transformació d'austenita a martensita com de l'enduriment dels propis grans austenítics. Respecte l'enduriment superficial, s'han comparat els resultats de la capa endurida de cada làmina amb la condició més crítica (valors més elevats de duresa) que és la condició de sense vibració i direcció del brunyit perpendicular al laminat.

Es posa de manifest que quanta més contingut de martensita inicial te la làmina, més fina serà la seva capa endurida com es mostra en la Taula 16.

Làmina i condició	Duresa (HV)	Capa endurida (μm)
R_SV_P_5	156.23 60.3%	400
L10_SV_P_5	113.08 34.7%	250
L20_SV_P_5	42.95 9.5%	80
L40_SV_P_5	44.40 9.7%	80

Taula 16. Valors de duresa de la capa endurida de cada làmina per a la condició de sense vibració i brunyit en la direcció perpendicular al laminat (31).

Per a conèixer com evoluciona aquesta duresa respecte el contingut inicial de martensita de cada làmina, s'ha comparat el perfil de dureses de cada làmina amb la condició usada en la *taula 16* ja que és la més crítica.

En la *Figura 69* es pot observar com la làmina amb un 18% de contingut inicial de martensita té un comportament quasi idèntic al de la làmina amb un 38% de contingut inicial de martensita mentre que la que té un 10% de contingut inicial de martensita present un comportament més semblant al de la làmina en recuit tot i que aquesta presenta una capa endurida més fina que la del recuit. També s'aprecia com els valors de duresa superficials més elevats pertanyen a la L40, seguida de ben a prop de la L20. Sembla que quanta més duresa inicial presenta la làmina, més elevada és la duresa superficial que s'aconsegueix. Per contra, quanta més duresa inicial te la làmina, s'assoleixen increments de duresa més petits respecte l'evolució que presenten les altres làmines. Per exemple, la làmina L10 presenta una duresa superficial d'aproximadament 451HV mentre que la de la L20 és de 510HV però, la làmina L10 aconsegueix un increment de duresa del 38.6% respecte el seu nucli, mentre que la làmina L20 només n'aconsegueix un increment del 13.4%. Per tant, podríem dir que quant menys contingut de martensita inicial presenti la làmina, més es veurà afectada per la tècnica de brunyit.

Els increments de duresa de la làmina de recuit i la del 38% de contingut inicial de martensita també es poden veure a la *Taula 17*.

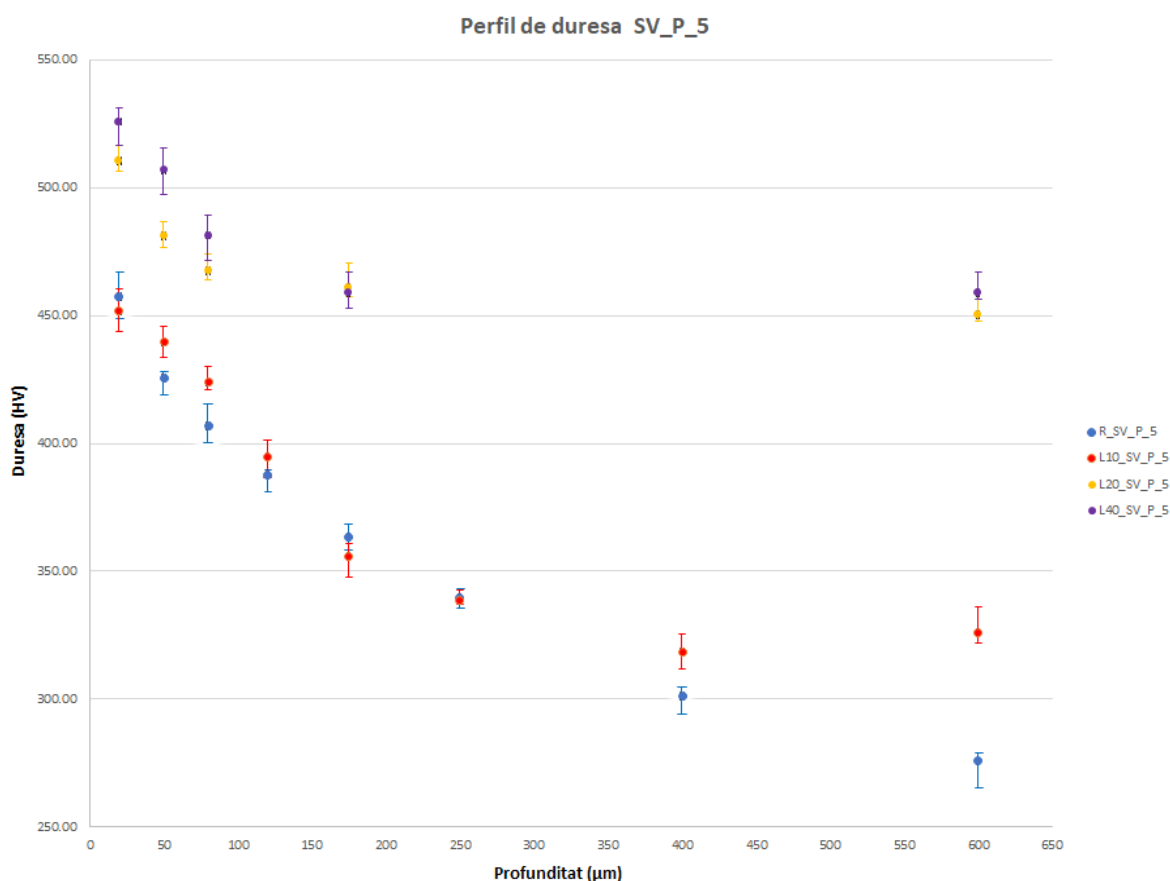


Figura 69. Evolució del perfil de duresa en funció del contingut de martensita inicial per a les condicions de sense vibració, brunyit perpendicular a la direcció del laminat i cinc passades (31).

Làmina i condició	Duresa al nucli (HV)	Duresa superficial (HV)	Increment(HV)
R_SV_P_5	275.74	457.51	181.77 65.9%
L10_SV_P_5	325.89	451.69	125.80 38.6%
L20_SV_P_5	450.26	510.54	60.28 13.4%
L40_SV_P_5	458.99	525.85	66.86 14.6%

Taula 17. Valors dels increments de duresa superficial de cada làmina respecte el seu nucli per a la condició de sense vibració i brunyit en la direcció perpendicular al laminat (31).

4. Anàlisi de l'impacte ambiental

Actualment es dona molta importància a l'impacte mediambiental que pot tenir qualsevol procés industrial per tal de protegir i preservar els recursos naturals, ja que aquests són limitats. Per aquest motiu i degut a la necessitat d'utilitzar tecnologies que no sigui nocives per la natura es valorarà l'efecte que ha tingut aquest projecte sobre el medi ambient.

Per a facilitar l'anàlisi, l'impacte ambiental s'organitzarà en dos grups en funció de si aquests danys s'han produït durant la preparació de les provetes (làmines d'acer) o s'han produït durant la realització de les petjades amb la tècnica de brunyit.

Impacte de la tècnica de brunyit

Durant la preparació de les provetes (mecanitzat i metal·lografies) s'identifiquen els següents aspectes negatius per al medi ambient:

- Ús d'àcids i abrasius en petites quantitats.
- Partícules de material, en molt petita quantitat, rebutjades sense cap tipus de tractament.
- Ús de taladrina.
- Consum energètic de la maquinària.
- Generació de soroll perjudicial per a l'operari i l'entorn.
- Fabricació de la maquinària, els estris i químics que impliquen consum de recursos i d'energia.

Durant el procés de brunyit s'identifiquen els següents aspectes negatius per al medi ambient:

- Fabricació de l'eina i útils per al brunyit, el que implica consum de recursos i d'energia.
- Consum energètic de la màquina de brunyir.
- Generació de soroll perjudicial per a l'operari i l'entorn.

Cal afegir però, el brunyit és un procés d'acabat que també presenta característiques avantatjoses i afables amb el medi ambient com són:

- Acabat sense arrencada de ferritja. No produeix residus.
- No requereix l'ús d'olis de tall.

5. Conclusions

Un cop finalitzat l'estudi realitzat sobre les dues làmines d'acer inoxidable austenític metastable (AISI 301 LN) i comparades amb les altres dos làmines del grup de recerca amb les condicions de vibració de l'eina de brunyir, direcció del brunyit i el número de passades amb que s'han realitzat les petjades, s'ha arribat a les següents conclusions en funció dels resultats obtinguts:

Superfície de les mostres

- Els resultats obtinguts de la rugositat superficial de les petjades no mostren cap diferència significativa respecte si aquestes han sigut realitzades amb l'eina de brunyir assistida amb vibració o sense vibració.
- S'observa com a mesura que s'incrementa el contingut de martensita, s'assoleixen rugositats superficials més baixes presentant una tendència logarítmica.
- Es pot observar que existeix una lleugera influència en la realització de les passades en direcció laminar o perpendicular al laminat, ja que en la direcció perpendicular al laminat s'obtenen uns valors de rugositat superficial una mica més elevats que en la direcció del laminat.
- Respecte al número de passades amb que s'han realitzat les petjades, s'observa com mentre que la làmina en estat de recuit obté una rugositat superficial major amb una passada, les mostres que tenen un 10%, 18% i 38% de fase inicial martensítica presenten una rugositat superficial més elevada amb cinc passades, fet que s'explica en l'apartat 3.2.3.

Microestructura de les mostres

- Pel que fa a nivell microestructural, en els perfils de duresa no s'observa cap diferència entre realitzar la petjada amb vibració a l'eina de brunyir o sense vibració. Per tant, la vibració no presenta cap influència significativa ni a nivell superficial ni microestructural.
- Si que s'observa una petita influència en la direcció en que s'ha realitzat el brunyit. En els casos on s'ha realitzat el brunyit en la direcció perpendicular a la laminació s'obtenen uns valors de duresa superficial una mica més elevats que en la direcció de la laminació.
- Quanta més duresa inicial presenta una mostra, més duresa superficial assoleix la petjada realitzada amb la tècnica de brunyit però, per contra, més baix és l'increment de duresa superficial que la mostra assoleix respecte la duresa original.
- Mitjançant la tècnica de brunyit amb bola, es pot aconseguir que un acer amb propietats semblants a la làmina en estat de recuit assoleixi valors de duresa superficial similars als d'una làmina d'acer amb 38% de fase inicial martensítica.

6. Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

Degut a que en la realització d'aquest projecte han intervingut molts factors, per a facilitar el pressupost total d'aquest s'ha distribuït en funció del tipus de cost generat. S'ha organitzat en funció de si es el cost d'un material, si es un cost generat per la maquinària emprada en qüestió o si el cost pertany a la feina realitzada per un operari, en funció del preu per hora que varia depenent de la feina realitzada per aquest.

<i>Material</i>	<i>Unitats</i>	<i>Cost [€/h]</i>	<i>Cost total [€]</i>
Làmina d'acer recuit	1	2.55	2.55
Làmina d'acer laminat	3	2.2	6.6
Mecanitzat amb ciselladora	32	3	96
Suport de mostres	1	200	200
Cubell de baquelita Durofast	1	250	250
Pot d'acetona	1	10	1.8
Disc de polit P80	1	1.8	1.3
Disc de polit P320	1	1.3	1.3
Disc de polit P600	1	1.3	1.3
Disc de polit 1200	1	1.3	1.3
Disc de polit 2500	1	1.3	1.3
Disc magnètic 3µm	1	24	24
Disc magnètic 6µm	1	24	24
TOTAL MATERIAL			620.15€

Taula 18. Pressupost del material emprat en el projecte.

Maquinària	Hores	Cost [€/h]	Cost total [€]
Microscopi òptic confocal	16	20	320
Interferòmetre	25	45	1125
Microscopi electrònic de rastreig	15	100	1500
Rugosímetre 3D	32	15	480
Talladora Streuers	5	10	50
Encastadora	8	8	64
Polidora	12	10	120
Microduròmetre	40	30	1200
TOTAL MAQUINÀRIA			4859€

Taula 19. Pressupost de la maquinaria emprada en el projecte.

Operari	Hores	Cost [€/h]	Cost total [€]
Tutors	80	60	4800
Tècnics de laboratori	20	50	1000
Projectista	720	30	21600
TOTAL HONORARIS			27400€

Taula 20. Pressupost dels operaris en el projecte.

Si tenim en compte la Taula 18, Taula 19 i Taula 20 on es mostren els pressupostos distribuïts segons els tipus de costos als que pertanyen, el cost total del projecte pujaria a 32979.15€.

7. Bibliografía

1. **UNE-EN 10020:2001.** *Definición y clasificación de los tipos de aceros.* 2014.
2. Clasificación de los aceros inoxidable. **BONNET.** *Suministros y maquinarias S.L.* [En línea] 1967. <http://www.bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>.
3. **Inchaurza, Adrian.** *Aceros inoxidable y aceros resistentes al calor.* s.l. : LIMUSA, 1981.
4. **Ibarra Echeverria, Mauricio, Núñez S., Eduardo y Huerta, José M.** *Manual Aceros Inoxidable.* s.l. : Indura, 2012.
5. **Vilavicencio Cevallos, Julio C.** *Microestructura/Propiedad en la Soldadura Gtaw entre Aceros Inoxidable y aceros al Carbono.* s.l. : Relación, 2012.
6. **Mesa Rueda, José L.** *Diagramas de Fase.* s.l. : Universidad del país Vasco , 2012.
7. Acers inoxidable martensítics. [En línea] <http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/#parte5>.
8. Composició y característiques de los acers inoxidable . **UTP.** [En línea] http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_inox.htm.
9. Tipus i graus d'acers inoxidable. **UPCommons.** [En línea] 2015. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/4/55868-4.pdf>.
10. Avantatges dels acers inoxidable. [En línea] 2015. <http://bibliotecadehumedas.blogspot.com/2014/05/ventajas-y-desventajas-del-acero.html>.
11. Boletín Técnico, Nomenclatura de aceros. [En línea] 2012. <http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/#parte5>.
12. **Hedström, P.** *Deformation induced martensitic transformation of metastable stainless steel AISI 301.* s.l. : Lulea University of Technology.
13. **Escolà, Marc.** *Efecte de les predeformacions dels acers inoxidable austenítics metaestables.* s.l. : TFG EUETIB (UPC), 2014.
14. **Kpodekon, C.** *Effet du pré-écrouissage sur la durée de vie d'aciers austénitiques de type 304L.* s.l. : Insitut National Dçdes Sciences Appliquées de Rouen, 2010.
15. **Torres, Carlos A. Espinoza.** Transformación martensítica y efecto memoria en materiales micro y nanoestructurados. *Instituto Balseiro Comisión Nacional de Energía Atómica Universidad Nacional de Cuyo S.C. de Bariloche.* [En línea] 2007. http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/264/1/1Espinoza_Torres.pdf.
16. **Osendi, M. J. y J. S. Moya.** *Fundamentos de la Transformación Martensítica. Su importancia en el Diseño de Futuros Materiales Cerámicos.* s.l. : Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr. Vol. 21 Num-1.
17. Callister, W.D. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales.* s.l. : Reverté , 2000.
18. Transformación martensítica por temple. **Scribd.** [En línea] <https://es.scribd.com/doc/31061083/Transformacion-martensitica>.

19. **Zapata Dederle, A.C.** *Mecanismos de deformación en aceros inoxidable austeníticos metaestables*. Barcelona : Proyecto de Tesis Doctoral, UPC, 2010.
20. **Reed Hill, R.** *Principios de Metalurgia Física*. México : CIESA , 1986.
21. *Temas de Ciencia y Tecnología*. Robles, Alberto Saldaña, y otros. 61, Guanajuato : Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, 2017, Vol. 21.
22. **Shiou, Fang-Jung y Ciou, Hong-Siang.** *Ultra-precision Surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball-polishing process*. 2008.
23. **Brehl, D.E. y Dow, T.A.** *Review of vibration-assisted Machining*. 2007.
24. **Avites, Ana M^a Duran.** *Efecto de la predeformación en la vida a fatiga de un acero inoxidable austenítico metaestable*. s.l. : ETSEIB, UPC, 2009.
25. **Jerez, Ramon.** *Design and characterisation of the VABB tool*. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2017. Proyecto de tesis doctoral.
26. Microduròmetre i Microduresa. [En línia] <http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/Anexo/microdurometro.htm>.
27. **Grasso, Juan Manuel Rodríguez, Valhuerdi, Adolfo Torres y González, Ailyn Alonso.** *Rugosidad Superficial*. s.l. : Universidad de Matanzas, 2008.
28. **Armas, Daniel J. Narváez.** *La Microscopía: Herramienta para estudiar cèl·lules y Tejidos*. [En línia] <http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/inicio.htm>.
29. **Swapp, Susan.** SEM. *University of Wyoming*. [En línia] https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html.
30. Principios básicos de la interferometría. [En línia] <http://www.renishaw.es/es/explicacion-de-la-interferometria--7854>.
31. **González, Roger.** *Aplicació de la tècnica de brunyit per a la millora de les propietats dels acers inoxidable austenítics metastables*. Barcelona : EEBE (UPC), 2018.
32. **Hinojosa, M. y Reyes, M.** *La rugosidad de las superficies: Topometría. Vol IV, Núm. 11*. 2001.

Annex A

A1. Resultats obtinguts mitjançant microscopis òptics làser

I. Resultats obtinguts amb el Microscopi òptic Confocal

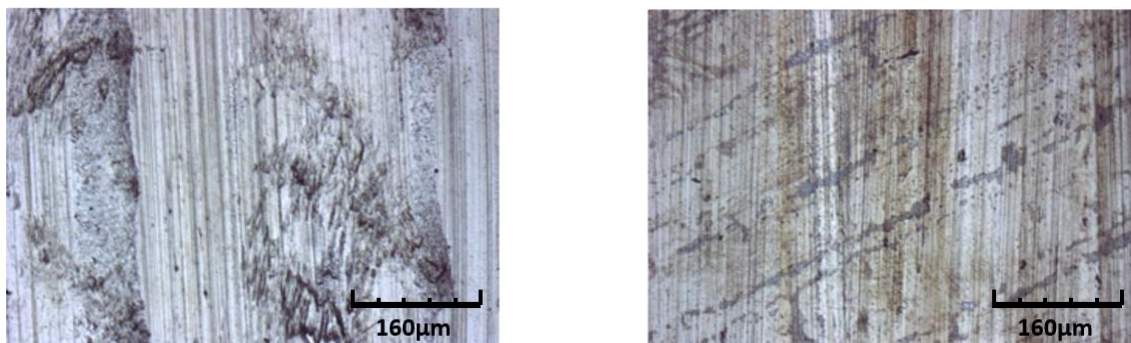


Figura 70. Esquerra: Làmina en condició de recuit amb 1 passada; Dreta: Làmina en condició de recuit amb 5 passades.

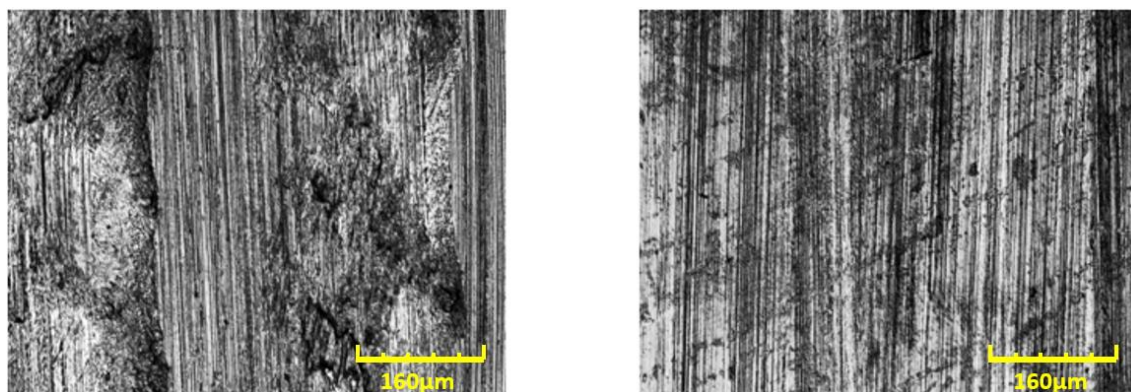


Figura 71. Esquerra: Làmina en condició de recuit amb 1 passada (Confocal); Dreta: Làmina en condició de recuit amb 5 passades (Confocal).

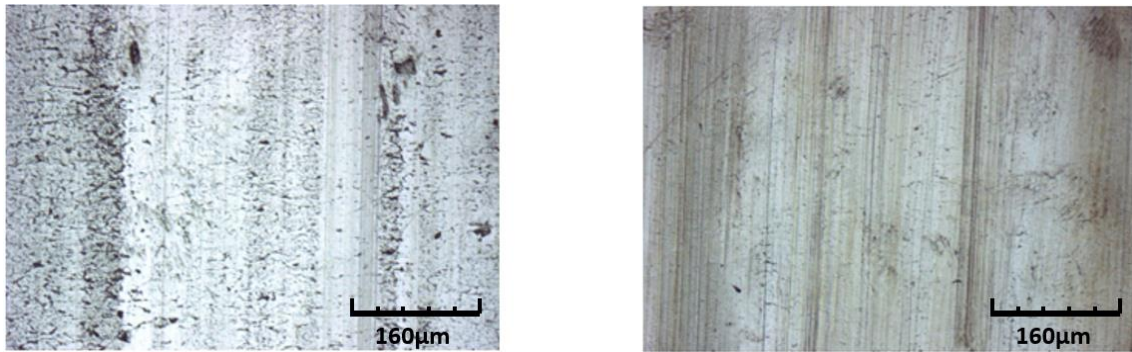


Figura 72. Esquerra: Làmina 10% de fase inicial de martensita amb 1 passada; Dreta: Làmina 10% de fase inicial de martensita amb 5 passades.

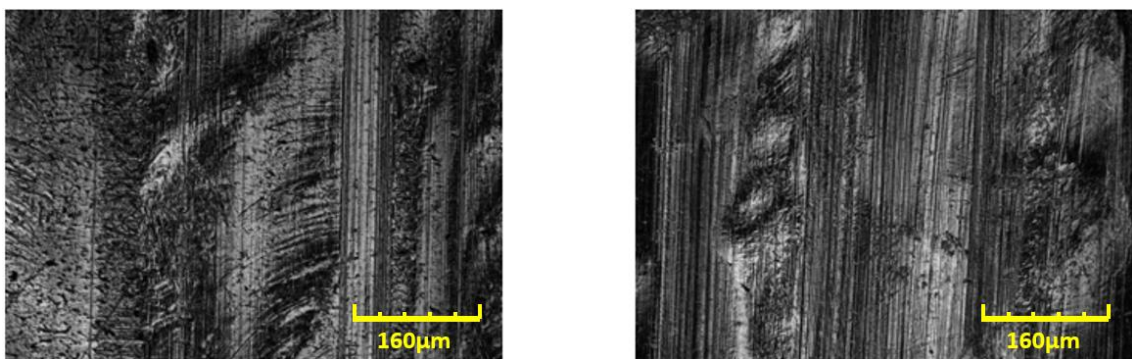


Figura 73. Esquerra: Làmina 10% de fase inicial de martensita amb 1 passada (Confocal); Dreta: Làmina 10% de fase inicial de martensita amb 5 passades (Confocal).

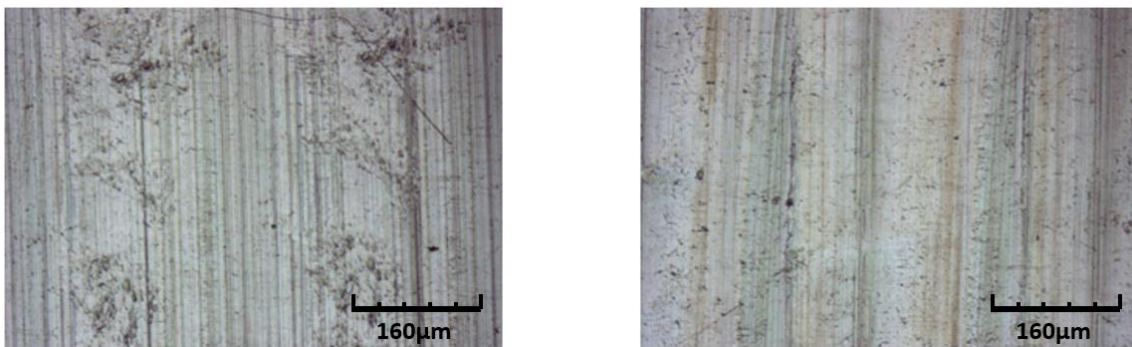


Figura 74. Esquerra: Làmina 20% de fase inicial de martensita amb 1 passada; Dreta: Làmina 20% de fase inicial de martensita amb 5 passades.

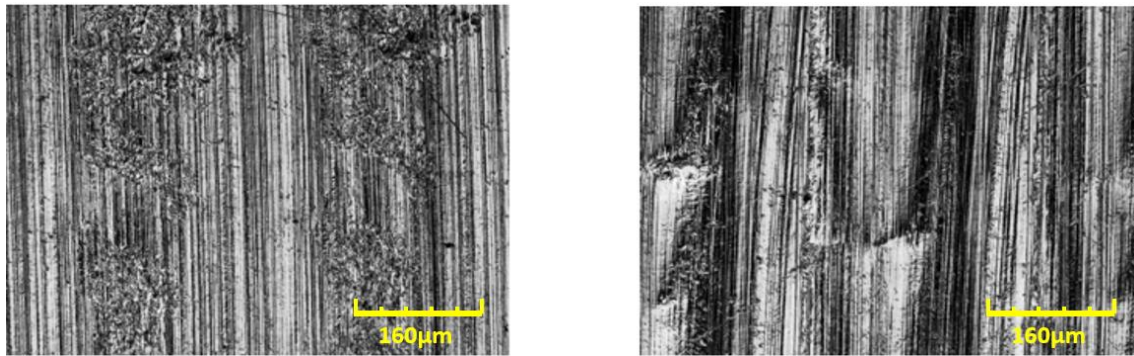


Figura 75. Esquerra: Làmina 20% de fase inicial de martensita amb 1 passada (Confocal);
Dreta: Làmina 20% de fase inicial de martensita amb 5 passades (Confocal).

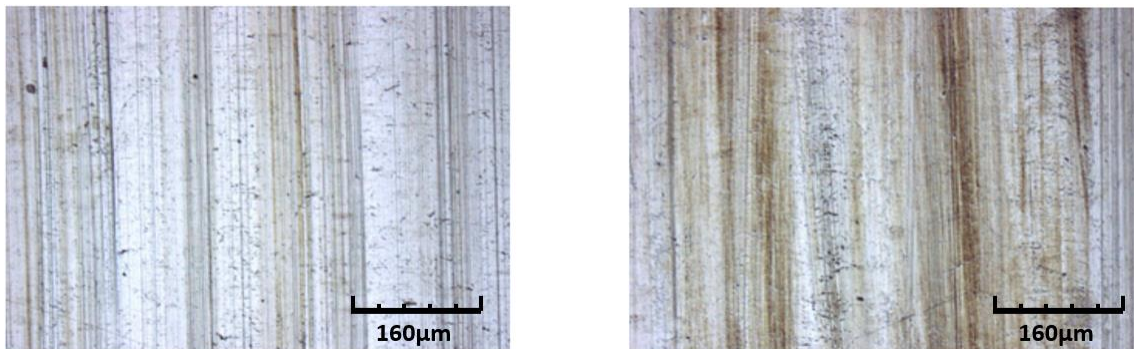


Figura 76. Esquerra: Làmina 40% de fase inicial de martensita amb 1 passada; Dreta: Làmina
40% de fase inicial de martensita amb 5 passades.

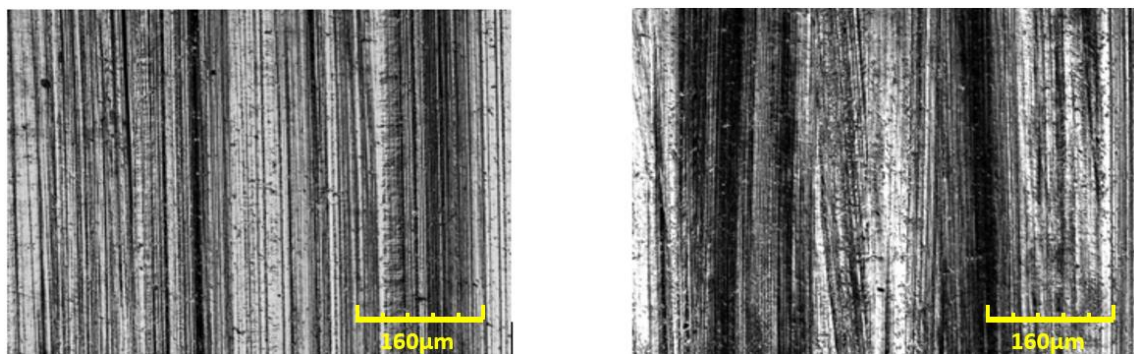


Figura 77. Esquerra: Làmina 40% de fase inicial de martensita amb 1 passada (Confocal);
Dreta: Làmina 40% de fase inicial de martensita amb 5 passades (Confocal).

A2. Resultats obtinguts de la rugositat superficial

I. Resultats obtinguts amb el Rugosímetre 3D

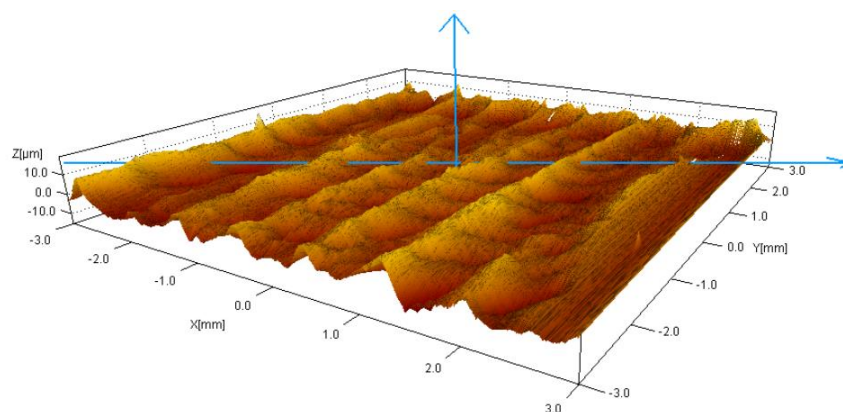


Figura 78. R_SV_P_1P.

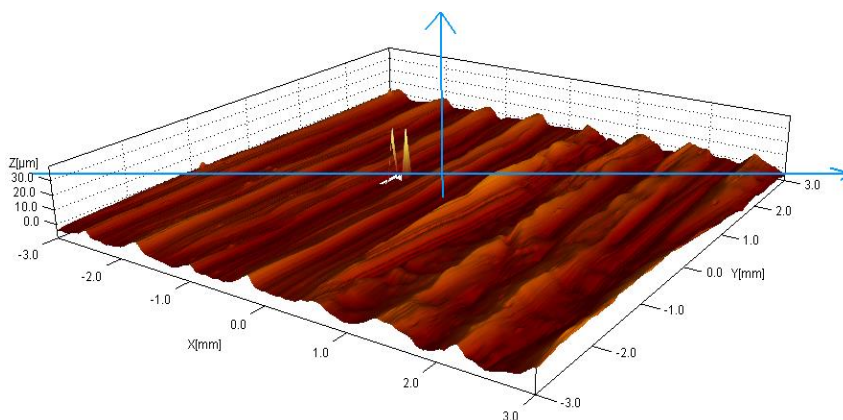


Figura 79. R_SV_P_5P.

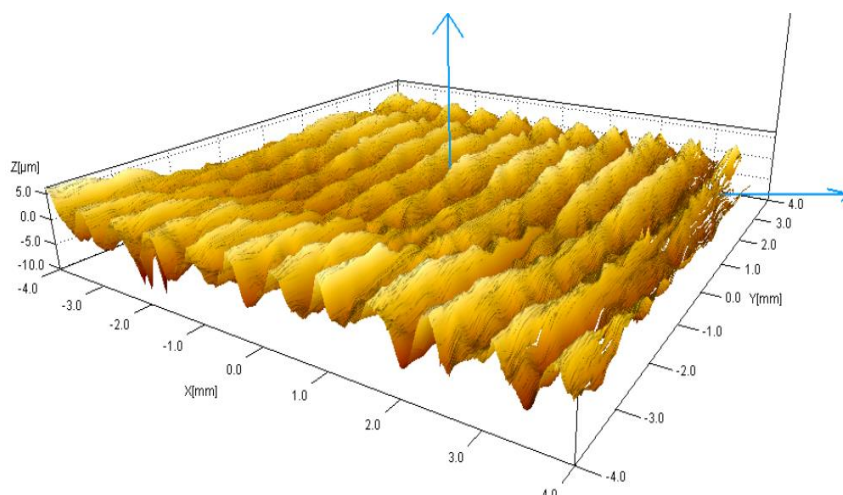


Figura 80. L10_SV_P_1P.

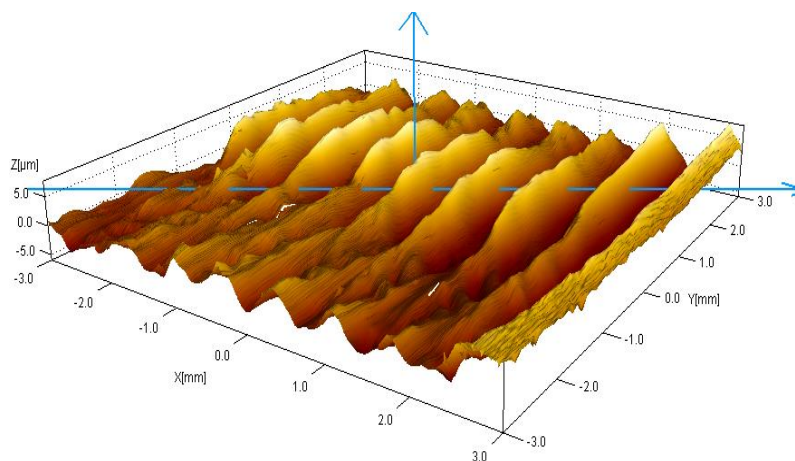


Figura 81. L10_SV_P_5P.

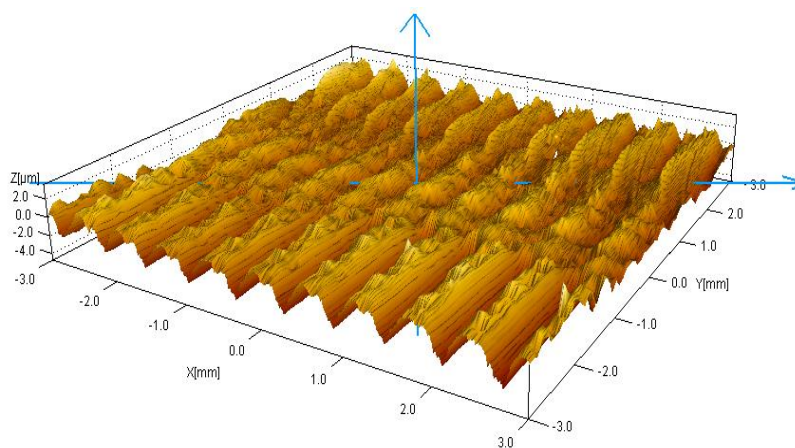


Figura 82. L20_SV_P_1P.

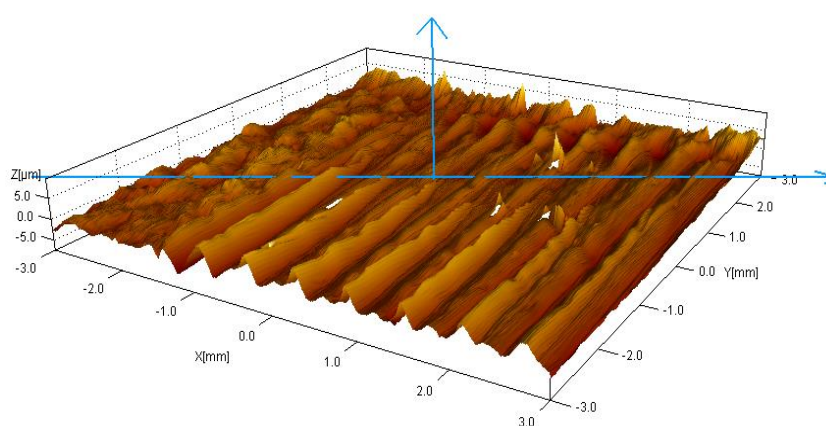


Figura 83. L20_SV_P_5P.

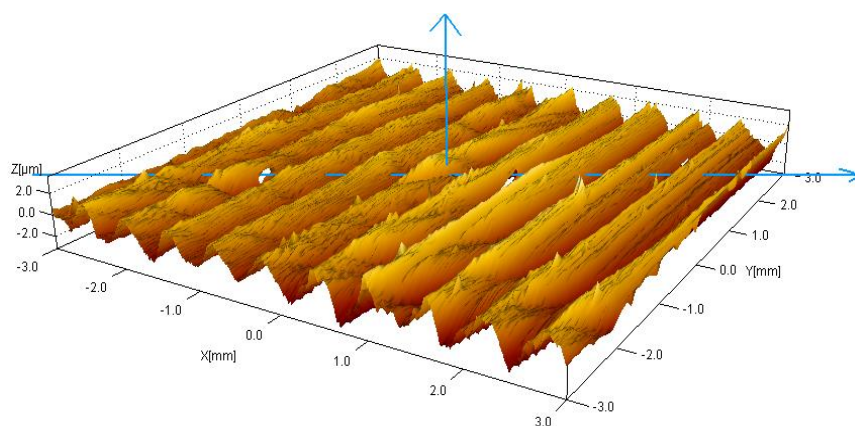


Figura 84. L40_SV_P_1P.

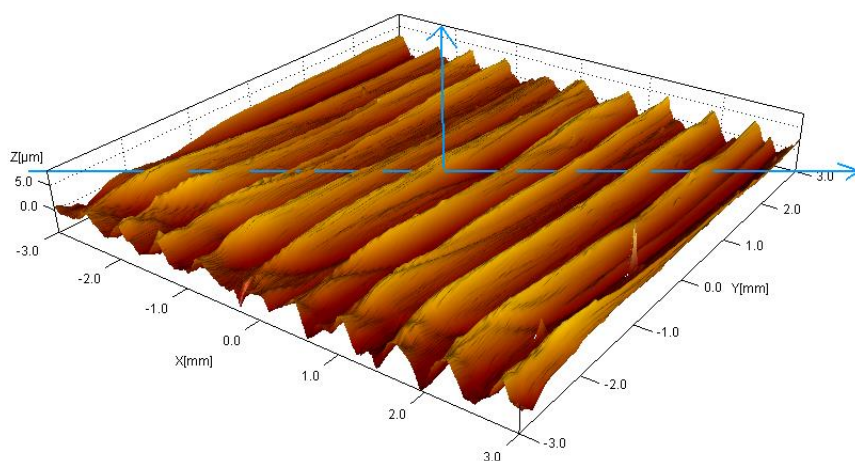


Figura 85. L40_SV_P_5P.

II. Resultats obtinguts amb l'Interferòmetre

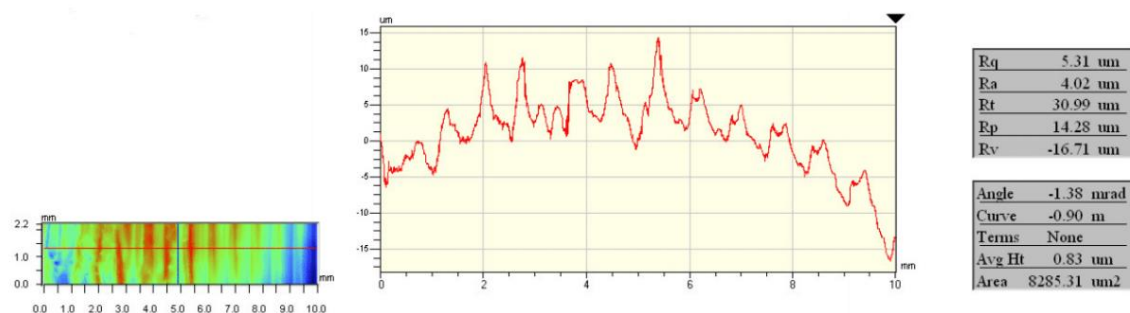


Figura 86. Perfil de rugositat superficial de la mostra R_SV_P_5.

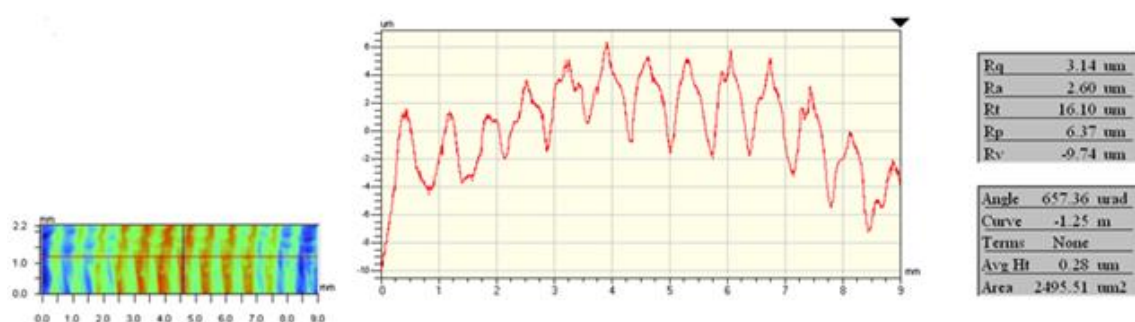


Figura 87. Perfil de rugositat superficial de la mostra L10_SV_P_5.

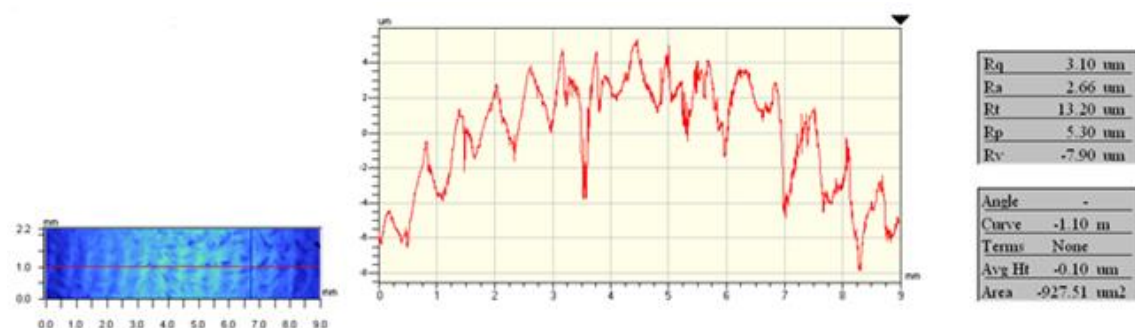


Figura 88. Perfil de rugositat superficial de la mostra L20_SV_P_5.

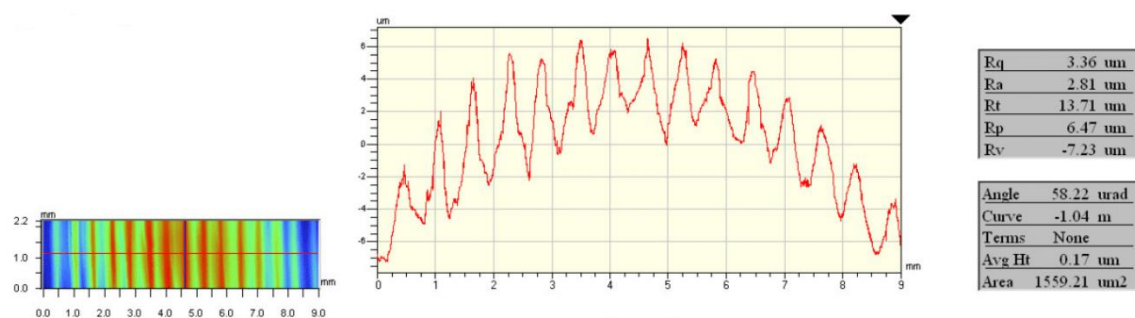


Figura 89. Perfil de rugositat superficial de la mostra L40_SV_P_5.

A3. Resultats obtinguts amb microdureses

I. Taules amb els valors de duresa

Duresa Vickers (HV)

Profunditat (μm)	20	50	80	120	175	250	400	600
R_SV_P_5	457.51	425.74	406.83	387.88	363.52	339.84	301.28	275.74
R_SV_L_5	466.12	456.46	428.16	395.75	376.54	325.21	288.86	253.74
R_AV_P_5	460.13	432.93	427.25	399.01	381.03	337.65	306.19	284.34
R_AV_L_5	436.92	421.27	404.77	387.08	351.09	346.17	303.08	287.70
L10_SV_P_5	451.69	439.52	423.85	394.90	355.89	338.61	318.64	325.89
L10_SV_L_5	412.89	403.19	378.42	367.51	350.97	335.75	329.20	314.83
L10_AV_P_5	438.66	411.74	402.47	367.61	358.51	338.90	334.32	326.40
L10_AV_L_5	431.91	411.32	413.44	379.11	361.83	351.35	325.36	327.90
L20_SV_P_5	510.54	481.17	467.59		461.21			450.26
L20_SV_L_5	466.81	468.45	454.82		461.30			440.12
L20_AV_P_5	499.44	461.37	441.72		431.19			425.86
L20_AV_L_5	488.13	458.45	445.79		430.17			434.23
L40_SV_P_5	525.85	506.75	481.45		458.99			458.99
L40_SV_L_5	461.81	446.13	487.79		459.36			440.61
L40_AV_P_5	519.26	474.75	484.99		452.11			469.72
L40_AV_L_5	448.82	438.38	443.78		429.99			424.62

Taula 21. Taula de valors de duresa de cada mostra per a les diferents profunditats.

Desviació duresa Vickers

Desviació	20	50	80	120	175	250	400	600
R_SV_P_5	18.57	5.63	17.87	4.12	9.95	6.96	7.25	6.02
R_SV_L_5	23.04	22.68	10.41	14.95	7.22	15.51	8.71	8.93
R_AV_P_5	4.98	14.89	9.16	12.04	7.61	10.06	14.02	8.37
R_AV_L_5	39.59	17.31	18.43	17.20	9.39	5.12	8.45	9.49
L10_SV_P_5	17.33	12.60	12.55	12.89	9.97	8.27	13.83	20.85
L10_SV_L_5	15.36	11.22	5.17	16.30	16.80	2.89	13.52	8.41
L10_AV_P_5	7.84	9.49	7.32	9.05	7.16	6.99	12.55	5.38
L10_AV_L_5	18.41	19.17	19.98	8.46	11.78	7.97	11.63	5.06
L20_SV_P_5	12.40	10.91	13.24		18.70			12.71
L20_SV_L_5	18.64	8.72	16.59		19.09			8.34
L20_AV_P_5	13.93	11.30	13.14		5.07			10.88
L20_AV_L_5	22.73	10.95	10.34		16.09			18.68
L40_SV_P_5	10.50	17.56	15.37		15.68			15.68
L40_SV_L_5	4.47	14.97	21.60		11.38			19.54
L40_AV_P_5	22.35	30.60	8.08		11.81			25.34
L40_AV_L_5	14.07	10.93	9.00		19.29			9.74

Taula 22. Taula de valors de la desviació de la duresa per a cada mostra.

II. Gràfiques dels perfils de duresa

Làmina R

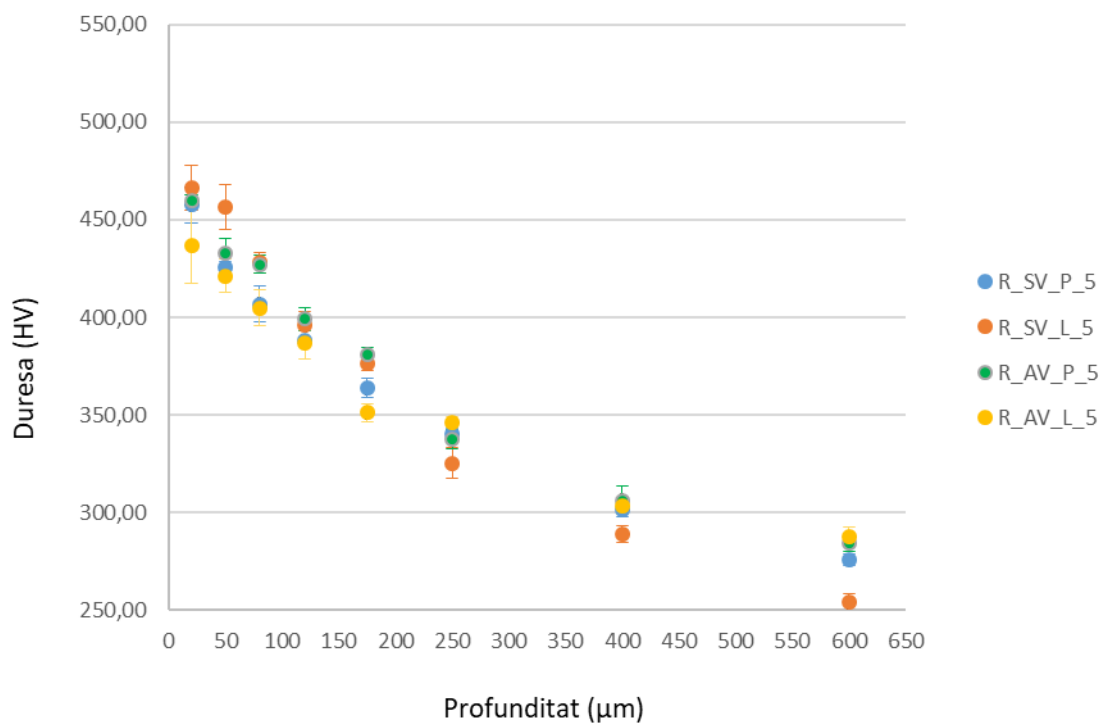


Figura 91. Perfil de duresa de la làmina de recuit per a les condicions de vibració i direcció de brunyit.

Làmina L10

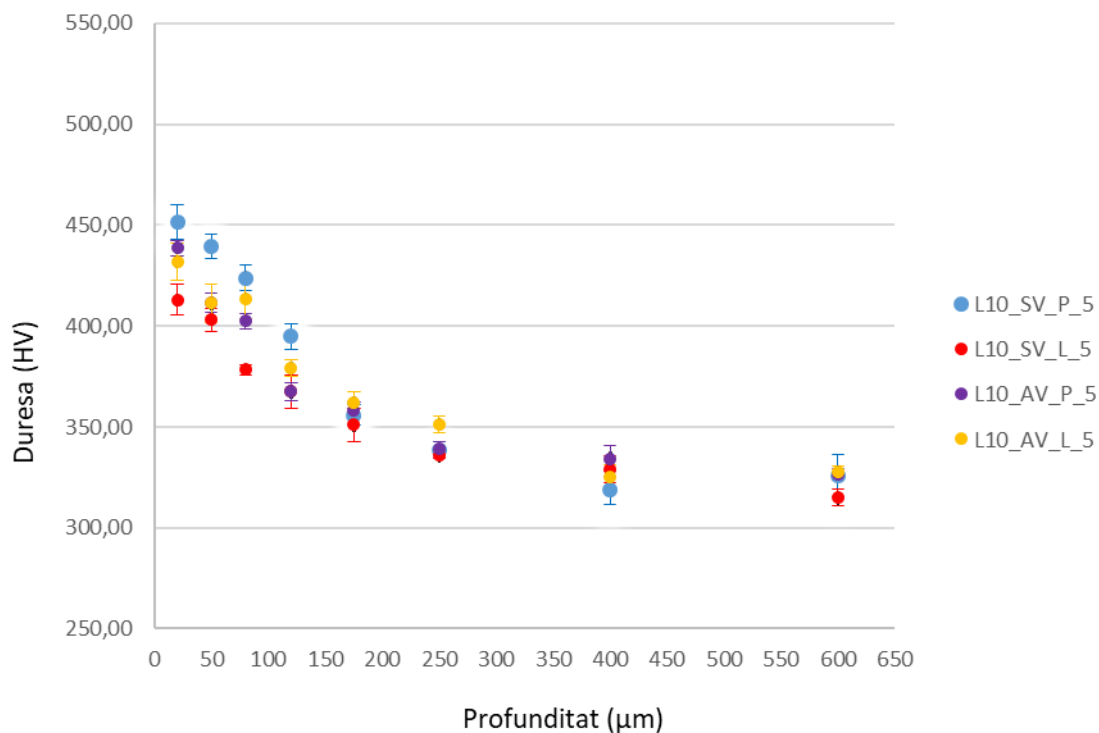


Figura 92. Perfil de duresa de la làmina de 10% de contingut inicial de martensita per a les condicions de vibració i direcció de brunyit.

Làmina L20

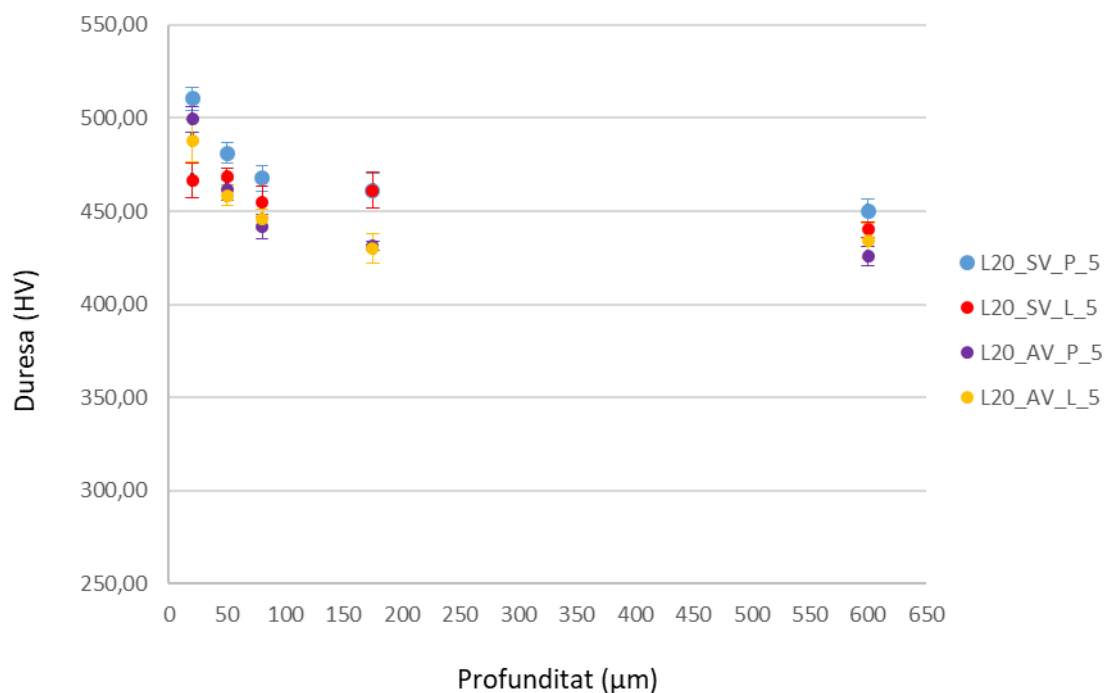


Figura 93. Perfil de duresa de la làmina de 20% de contingut inicial de martensita per a les condicions de vibració i direcció de brunyit.

Làmina L40

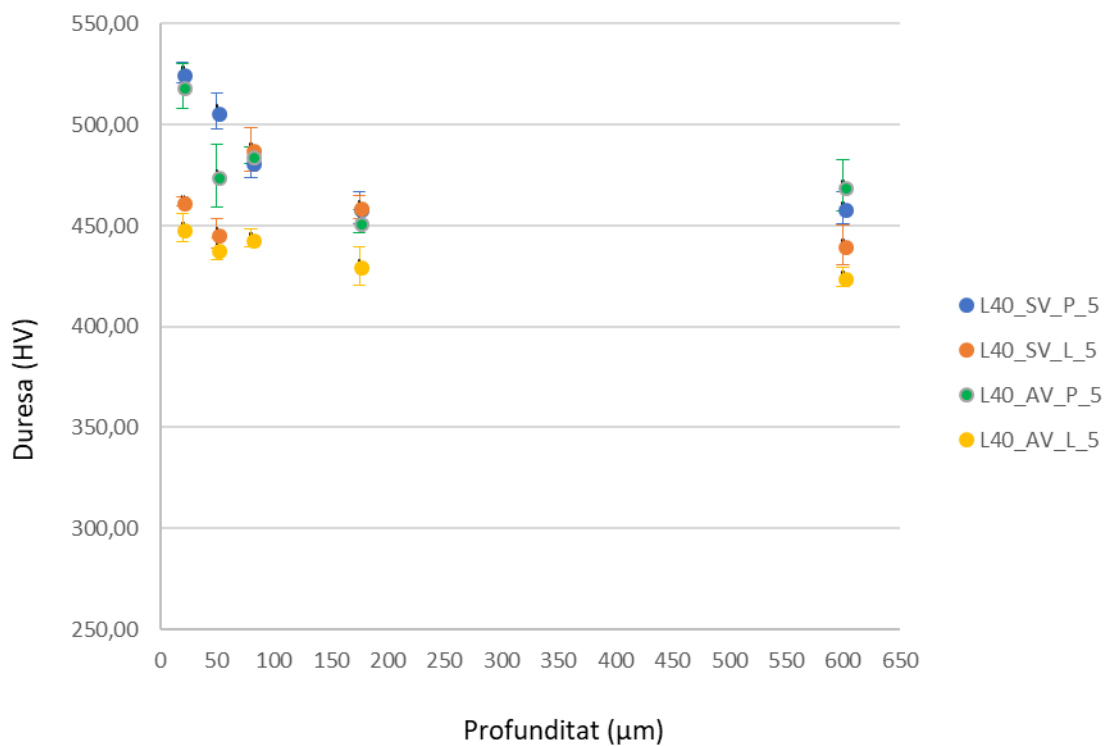


Figura 94. Perfil de duresa de la làmina de 40% de contingut inicial de martensita per a les condicions de vibració i direcció de brunyit.



VIST I PLAU D'AUTORIZACIÓ DE DEFENSA DE TREBALL FI DE GRAU

Jo, Gemma Fargas Ribas Directora del
TFG dut a terme per l'estudiant:

Nom : Eric

Cognoms : Rodríguez Mañá

DNI : 39444225-F

Grau en Enginyeria : Mecànica

ACREDITO:

Que l'estudiant es troba en condicions de realitzar, en la present convocatòria, la defensa del treball de fi de Grau que a continuació es relaciona:

Títol del TFG: Aplicació de la tècnica de brunyit per a la millora de les propietats dels acers inoxidables austenítics metastables.

INFORMACIÓ NECESSÀRIA		
Competència genèrica a avaluar		
Codirector (en cas que n'hi hagi)		Ramon Jerez Mesa
Empresa externa (en cas de modalitat B o D)	Nom de l'Empresa	
	Codirector de l'empresa	

I perquè consti, a petició de l'interessat i als efectes d'autorització de defensa de TFG, signo el present vist i plau.

Barcelona a, de de 20

La Directora del TFG

Signatura:

